



Etude comportementale et Neurofonctionnelle des interactions perceptivo-motrices dans la perception visuelle de lettres. Notre manière d'écrire influence-t-elle notre manière de lire?

Marieke Longcamp

► To cite this version:

Marieke Longcamp. Etude comportementale et Neurofonctionnelle des interactions perceptivo-motrices dans la perception visuelle de lettres. Notre manière d'écrire influence-t-elle notre manière de lire?. Neurosciences [q-bio.NC]. Université de la Méditerranée - Aix-Marseille II, 2003. Français. NNT: . tel-00172023

HAL Id: tel-00172023

<https://theses.hal.science/tel-00172023>

Submitted on 13 Sep 2007

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



UNIVERSITE DE LA MEDITERRANEE – AIX-MARSEILLE II

Ecole doctorale des Sciences de la Vie et de la Santé

THESE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LA MEDITERRANEE

Discipline : Sciences de la Vie

Spécialité : Neurosciences

Soutenue publiquement le 19 décembre 2003

Marieke **LONGCAMP**

**ETUDE COMPORTEMENTALE ET NEUROFONCTIONNELLE DES INTERACTIONS
PERCEPTIVO-MOTRICES DANS LA PERCEPTION VISUELLE DE LETTRES.
NOTRE MANIERE D'ECRIRE INFLUENCE-T-ELLE NOTRE MANIERE DE LIRE?**

Directeur de Thèse :
Dr. Jean-Luc VELAY

JURY

Pr. André NIEOULLON, Université Aix-Marseille II, Marseille
Pr. Jean-Pierre ORLIAGUET, Université P. Mendès France, Grenoble
Dr. Angela SIRIGU, CNRS, Bron
Dr. Michèle KAIL, CNRS, Paris
Dr. Marie-Thérèse ZERBATO-POUDOU, I.U.F.M., Aix-Marseille
Dr. Jean-Luc VELAY, CNRS, Marseille

Président
Rapporteur
Rapporteur
Examinatrice
Examinatrice
Directeur

La lecture et l'écriture sont traditionnellement considérées comme deux objets d'études distincts par les Neurosciences Cognitives. Pourtant, ces deux habiletés sont étroitement mises en relation au cours de leur apprentissage initial. Dans ce travail, nous avons tenté de mettre en évidence des interactions perceptivo-motrices dans l'écrit, c'est à dire de montrer que lorsque nous reconnaissons les lettres qui forment les mots, nous nous référons implicitement aux mouvements que nous produirions pour écrire ces mêmes lettres. Pour cela, nous avons adopté deux approches.

La première a consisté à mesurer, par Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle (IRMf), l'activité cérébrale de sujets adultes qui lisaient ou qui écrivaient des lettres ou des symboles graphiques inconnus. Nous avons observé qu'une zone corticale prémotrice qui est activée pendant l'écriture, l'est aussi pendant la lecture de lettres, alors que les sujets sont immobiles. Un certain nombre d'arguments nous ont permis d'avancer l'idée que cette zone spécifique serait impliquée dans la représentation des mouvements nécessaires à écrire chaque lettre.

La seconde a consisté en une étude comportementale en école maternelle, auprès d'enfants qui ne savaient pas encore lire et écrire (3-5 ans). Nous avons comparé, chez ces enfants, l'apprentissage traditionnel de la lecture/écriture et l'apprentissage avec un clavier, dans le but de mesurer l'effet de ces deux méthodes sur les capacités subséquentes de reconnaissance visuelle des lettres. Après l'apprentissage, les enfants qui avaient appris à la main discriminaient mieux les lettres de leurs images en miroir que ceux qui avaient appris au clavier. Cet avantage de l'écriture manuscrite n'apparaissait qu'après une semaine et uniquement chez les enfants les plus âgés. Ces données indiquent que les mouvements d'écriture participent à la mémorisation de l'orientation des lettres.

L'ensemble de ces résultats, discutés dans le cadre de la théorie motrice de la perception, suggère un couplage fonctionnel entre les versants perceptif et productif du langage écrit. Parce que nous apprenons simultanément à lire et à former les lettres en les traçant, nos aptitudes à la lecture pourraient en partie dépendre de notre manière d'écrire.

Un grand merci à toutes les personnes qui m'ont accompagnée dans cette drôle d'aventure, et qui ont contribué à ce travail.

J.L. Velay, qui l'a dirigé.

M. Kail, A. Nieoullon, J.P. Orliaguet, A. Sirigu et M.T. Zerbato-Poudou, qui ont accepté de l'évaluer.

J.L. Anton, M. Roth, B. Nazarian, J.C. Gilhodes, M. Besson et son équipe, qui ont collaboré à la mise en place et à la réalisation des expériences.

Dans le désordre,

Aurélia, Florence, Julie, Philippe, Ben, Seb, Cyrille, Vincent, Fred, Yassine, Seb, Jean Marc, Jean Michel, Karine, Julien, Bertrand, Sandrine, Bénédicte, Kevin, Gilel, Elsa, Bruno, Sophie, Jean Jacques, Sandra, Fabrice, Christophe, Radouane, Magali, Christine, Laurent, Raphaël, Alexis, Justine, Amélie, Amandine, Boris, Arnaud, Karen, Laurène, Nathalie, Raphaël, Romain, Clément, Jade, Ambre, Lucas, Marie-Laure, Charline, Emmanuel, Loup, Emilie, Clément, Guillaume, Quentin, Christophe, Vincent, Joseph, Soline, Hugo, Hadrien, Grégory, Lisa, Alexandre, Chloé, Mael, Damien, Lisa, Lucas, Mélanie, Chloé, Yanis, Alexandre, Kenan, Emma, Juliette, Lisa, Jeremy, Léa, Coline, Tristan, Alexandre, Capucine, Nicolas, Chérine, Gaétan, Hédi, Julien, Julie, Laura, Jean Luc, Ludovic, Céline, Fabio, Paola, Adrien, Emma, Alison, Florent, Julien, Ruben, Salomé, Solène, Ugo, Victor, Elise, Fanny,
les sujets.

Les équipes enseignantes des écoles maternelles Chateausec, Desautel et Valmante, qui nous ont accueillis dans leurs classes.

E. Legallet et D. Laugier, qui m'ont apporté un soutien informatique précieux.

C. Assaïante, qui m'a « marrainée ».

Les membres du groupe de travail IRMF, qui a été pour moi un lieu d'échanges important. Particulièrement Daniele, qui m'a transmis avec beaucoup de patience les bases de l'utilisation de SPM, et Bruno, avec qui j'ai pu avoir des discussions méthodologiques « lumineuses ».

Mon filleul Eliott, et ses copines, Colline et Eliette, qui font de la figuration.

Ben, Céline, Christina, et Isa, qui ont été là, en ces temps mouvementés, pour me sourire et m'écouter.

Merci à Kevin, qui a simplement su m'encourager.

Publications issues de la thèse

- Longcamp, M., Velay, J. L., Gilhodes, J. C., Besson, M., & Zerbato-Poudou, M. T. (2000). Impact de la motricité manuelle au cours de l'apprentissage de la lecture et de l'écriture: comparaison des écritures manuscrite et dactylographique. L'apprentissage : une approche transdisciplinaire. Journées Internationales d'Orsay sur les Sciences Cognitives. 189-192.
- Longcamp M. Anton J.L., Roth M. & Velay J.L. (2003) Visual presentation of single letters activates a premotor area involved in writing, **Neuroimage**, 19(4):1492-1500
- Velay J.L., Longcamp M. et Zerbato-Poudou M.T. (2004) Le stylo et le clavier. Notre mode d'écriture influence t'il notre perception de l'écrit ?, à paraître dans '**Ecriture et Sciences Cognitives**', Annie Piolat (Ed) Presses Universitaires de Provence.
- Velay J.L., Longcamp M. et Zerbato-Poudou M.T. (2004) Apprendre à écrire les lettres pour mieux les reconnaître, à paraître dans '**Agir dans l'espace**' Bullier J. et Thinus-Blanc C. (Eds), Editions de la maison des Sciences de l'Homme.
- Velay J.L., Longcamp M. et Zerbato-Poudou M.T. (2004) De la plume au clavier : Est-il toujours utile d'enseigner l'écriture manuscrite ? à paraître dans '**Comprendre les apprentissages : Psychologie cognitive et éducation**' E. Gentaz et P. Dessus (Eds), Dunod.
- Longcamp M., Zerbato-Poudou M.T. and Velay J.L. Writing practice influences the recognition of letters orientation in preschool children, (soumis)
- Longcamp, M., Anton, J. L., Roth, M., & Velay, J. L. Premotor activations in response to visually presented single letters depend on the hand used to write: a study in left-handers, (soumis).

ABREVIATIONS :

AIP : aire intrapariétale antérieure (anterior intraparietal)

BOLD : blood oxygenation level-dependant

EEG : électroencéphalographie

FWHM : full width at half maximum

IRMf : imagerie par résonance magnétique fonctionnelle

MEG : magnétoencéphalographie

ROI : région d'intérêt (region of interest)

SMA : aire motrice supplémentaire (supplementary motor area)

SPM99 : logiciel « statistical parametric mapping »

TEP : tomographie par émission de positons

TMPP : théorie motrice de la perception de la parole

TMS : stimulation magnétique transcrânienne (transcranial magnetic stimulation)

vPMinf, vPMsup : cortex prémoteur ventral inférieur et supérieur

LORSQUE LA SOCIÉTÉ QUESTIONNE LES NEUROSCIENCES	9
INTRODUCTION.....	13
I. THÉORIE(S) MOTRICE(S) DE LA PERCEPTION : GÈNESE ET CONDITIONS DE MISE EN JEU DES INTERACTIONS PERCEPTIVO-MOTRICES.....	15
<i>I.A. Généralités</i>	<i>15</i>
<i>I.B. Interactions perceptivo-motrices dans la perception du mouvement.....</i>	<i>17</i>
1. Lois de mouvement et perception du mouvement biologique	17
2. Perception d'actions significatives.....	19
a. La théorie motrice de la perception de la parole (TMPP)	19
b. Le système miroir	20
<i>I.C. Interactions perceptivo-motrices et représentations spatiales.....</i>	<i>21</i>
1. Ontogenèse : le dialogue sensorimoteur.....	21
2. Espace des lieux : codage de l'espace péripersonnel	23
3. Espace des objets.....	25
a. Dissociations neuropsychologiques.....	26
b. Le système « canonique »	28
c. Imagerie mentale sur des objets tridimensionnels.....	30
d. Un cas particulier d'objets : les formes graphiques	31
II. LA LETTRE	33
<i>II.A. Données sur la perception visuelle de lettres</i>	<i>33</i>
1. Les étapes initiales de la reconnaissance des mots écrits.....	33
2. Données comportementales, hypothèses fonctionnelles	38
3. Troubles de reconnaissance des lettres dans l'alexie pure	39
4. Bases neurales	41
<i>II.B. Données sur les aspects moteurs de l'écriture.....</i>	<i>42</i>
1. Les paramètres invariants du mouvement : indices sur la nature des programmes moteurs.....	43
a. Invariances cinématiques.....	44
b. Invariance spatiale.....	46
2. Analyse des productions dans les agraphies d'origine motrice.....	48
3. Bases neurales	52
4. Une autre manière d'écrire : la dactylographie	55
III. INTERVENTION DE PROCESSUS MOTEURS DANS LE TRAITEMENT VISUEL DE LETTRES	57
<i>III.A. Simulation du mouvement et perception de traces manuscrites</i>	<i>57</i>
<i>III.B. Interactions entre représentations motrice et visuelle des caractères</i>	<i>60</i>
1. Idéogrammes et ordre d'écriture des traits.....	60
2. Imagerie mentale de lettres	62
3. Quand l'écriture favorise la lecture, et quand son absence la perturbe : cas neuropsychologiques.....	63
<i>III.C. Effets de l'apprentissage simultané de l'écriture et de la forme visuelle des lettres</i>	<i>65</i>
1. Les premières étapes de l'apprentissage de la lecture et de l'écriture	65
2. Données sur le rôle de la motricité graphique dans l'apprentissage de la lecture....	68
PARTIE EXPERIMENTALE	71
I. ACTIVATIONS CÉRÉBRALES AU COURS DE LA PERCEPTION DE LETTRES CHEZ L'ADULTE....	73
<i>I.A. Comparaison des activations cérébrales au cours de la perception et de l'écriture de lettres et de pseudolettres.....</i>	<i>75</i>
1. Méthodes	75

a. Protocole.....	75
Sujets	75
Design expérimental.....	75
b. Acquisition des données.....	78
c. Traitement des données	78
Prétraitements.....	78
Analyses statistiques	81
Où se trouvent les activations ?.....	82
2. Résultats	85
a. Analyse de groupe	85
b. Analyse en régions d'intérêt.....	91
3. Discussion	93
a. Cortex prémoteur latéral.....	93
Cortex prémoteur et mouvements des yeux	93
Cortex prémoteur et articulation subvocale	95
Cortex prémoteur et écriture	95
b. Rôle de la SMA	97
c. Conclusion.....	98
<i>I.B. Comparaison des activations cérébrales de sujets gauchers et droitiers, au cours de la perception de lettres et de pseudolettres</i>	<i>100</i>
1. Méthodes	100
a. Sujets	100
b. Design expérimental et traitement des données	100
2. Résultats	100
3. Discussion	104
a. vPMsup : une aire graphomotrice.....	104
b. vPMinf : un effet aspécifique	105
c. Cortex pariétal, écriture et perception	107
d. Des stratégies différentes en perception, chez les gauchers et les droitiers ?	107
II. SYNTHESE.....	109
III. INFLUENCE DE LA MOTRICITE GRAPHIQUE SUR LA PERCEPTION VISUELLE DE LETTRES CHEZ DES ENFANTS PRE-LECTEURS	112
1. Méthodes	112
a. Protocole.....	112
Sujets et formation des groupes	113
Apprentissage	114
Apprentissage par écriture manuscrite	114
Apprentissage par le clavier	115
Tests de reconnaissance	116
b. Traitement des données	117
2. Résultats	117
a. Analyses préliminaires	118
b. Analyse finale.....	119
Réponses Correctes (RC)	120
Réponses en Miroir (RM)	121
c. Analyse par lettre.....	123
3. Discussion	125
a. Effet sur l'orientation spatiale des caractères	126
b. Effet du délai post-apprentissage	128
c. Apprentissage et facteurs développementaux	130

IV. SYNTHESE	132
V. APPRENTISSAGE, PAR DES SUJETS ADULTES, DE FORMES GRAPHIQUES INCONNUES PAR ECRITURE MANUSCRITE ET DACTYLOGRAPHIE	134
1. Méthodes	134
a. Matériel.....	135
b. Procédure.....	136
Phase d'apprentissage	136
Apprentissage par écriture manuscrite	137
Apprentissage par le clavier	137
Tests de reconnaissance de l'orientation du caractère	138
2. Résultats	138
3. Discussion	140
DISCUSSION	143
I. RESUME DES PRINCIPAUX RESULTATS OBTENUS, PERSPECTIVES IMMEDIATES	145
II. UN RESEAU MULTIMODAL POUR CODER L'IDENTITE DES LETTRES	146
III. INTERACTIONS PERCEPTIVO-MOTRICES : STRATEGIE GENERALE ET SPECIFICITE	151
IV. EVOCATION AUTOMATIQUE, IMAGERIE MENTALE ET EXECUTION REELLE DES MOUVEMENTS.....	152
V. IMPLICATIONS POUR LES TROUBLES DU DEVELOPPEMENT DE L'ECRIT : L'HYPOTHESE MOTRICE DE LA DYSLEXIE	153
VI. AUTRES SYMBOLES : LES CHIFFRES ET LES NOTES DE MUSIQUE	156
CONCLUSION : NOTRE MANIERE D'ECRIRE INFLUENCE T-ELLE NOTRE MANIERE DE LIRE ?	159
REFERENCES.....	163
ANNEXES.....	180

LORSQUE LA SOCIETE QUESTIONNE LES NEUROSCIENCES

Imaginons-nous dans un roman de science-fiction, qui prendrait place dans un monde futuriste.

Le papier et le stylo ne sont plus qu'un lointain souvenir, depuis longtemps remplacé par des écrans numériques, des claviers et des souris ergonomiques. Nous ne signons plus qu'en apposant notre empreinte digitale ou notre carte magnétique identificatrice dans des emplacements prévus à cet effet sur les documents électroniques. La liste des courses pour samedi a directement été dictée à l'ordinateur qui l'a envoyée au supermarché. Les achats sont réglés avec une carte bancaire, en tapant un code sur un clavier, il y a longtemps que les chèques et les billets de banque n'existent plus...

Colline va à l'école primaire avec sur son dos (ou dans sa poche ?) son cartable informatique, qu'elle utilise pour apprendre à compter, dessiner, faire de la musique, et surtout lire et écrire. Sa petite sœur Eliette a 4 ans, elle est encore à la maternelle. Aujourd'hui avec la maîtresse, la classe va travailler sur le site Internet de l'école, y ajouter des images, et le nom d'Eliott, le nouveau, arrivé la semaine dernière.

On pourrait imaginer de nombreuses situations semblables, et en y réfléchissant, s'agit-il vraiment de science-fiction ? Nous sommes de fait amenés dans notre vie quotidienne à interagir avec un environnement qui est de plus en plus virtuel. Il est effectivement possible de faire ses courses de chez soi, en restant devant son ordinateur. En plus des cartes bancaires il existe désormais des portes-monnaie électroniques. L'évolution technologique gagne aussi lentement mais sûrement l'école et modifie les enseignements qui y sont dispensés. Certains départements équipent déjà leurs collégiens d'ordinateurs portables. L'école maternelle Valmante, dans laquelle nous avons réalisé une partie des expériences, est dotée d'une belle salle informatique et a créé son propre site Internet (<http://www.maison-orangina.org/assocs/maternellevalmante/>). Il est donc manifeste que les nouvelles technologies induisent et imposent d'ores et déjà de nouveaux comportements, et de nouveaux modes d'apprentissage.

Le papier et le stylo ne sont pas encore un lointain souvenir. Mais il n'est pas complètement irréaliste de penser que l'avènement des ordinateurs et du traitement de texte les en rapproche. Colline, Eliette et Eliott apprendront peut être vraiment à écrire directement sur un clavier, avec des logiciels adaptés, sans plus passer par le lent et fastidieux apprentissage de l'écriture manuscrite... Est-on aujourd'hui capable de mesurer les conséquences que pourrait avoir un changement aussi fondamental ?

Les comportements induits par l'utilisation du traitement de texte et de leurs fonctionnalités particulières (copier/coller, correcteur automatique...) ont beaucoup été discutés (Anis, 1998; Cochran-Smith, 1991 ; voir aussi le numéro spécial du mensuel « Lire » d'avril 2000 titré 'Comment la technologie modifie l'écriture' et dans lequel on pourra par exemple trouver un lexique du parler « cyber »). Il s'agit de déterminer si la création de textes, la structure des phrases, ou les capacités en orthographe seront affectées par l'outil utilisé. En revanche, un des changements imposés par l'usage des ordinateurs a beaucoup moins retenu l'attention : il s'agit des modifications du *geste d'écriture* liées à l'usage du clavier. Ce sont ces modifications qui ont été à la base des questions posées dans ce travail.

La même évolution s'est produite pour le dessin industriel, où les pratiques actuelles, grâce aux nouvelles technologies (conception assistée par ordinateur ou CAO), se différencient très fortement des anciennes, notamment parce que l'activité manuelle y est très nettement éliminée. Or cette élimination, si l'on en croit certains psychologues, n'est pas sans conséquences (Poitou, 1992). La conception des automobiles est un exemple intéressant de ce point de vue. Hier encore, elle passait par un certain nombre d'étapes et nécessitait des savoir-faire divers: le dessinateur, qui traçait à la main les formes de la voiture, le modelleur qui confectionnait les maquettes à différentes échelles... Aujourd'hui, la machine prend tout en charge. Les postes de CAO limitent la perception des formes à la seule activité visuelle, et l'activité manuelle à la manipulation d'un clavier et d'une souris. Le concepteur ne dispose à l'écran que d'une reconstruction des 3 dimensions sur une image plane. Or, il se trouve qu'il est parfois surpris des différences qui apparaissent entre l'objet désiré, la représentation qu'il en avait, et l'objet finalement réalisé. Il a également été constaté que les techniciens de formation ancienne, habitués à manipuler les matériaux et les formes, ont plus d'aisance, face aux représentations tridimensionnelles, que les dessinateurs formés directement sur ces logiciels qui ont du mal à se défaire des conventions de représentation plane. Ces observations

amènent à s'interroger sur la réduction de l'activité manuelle imposée par les nouveaux outils, réduction qui pourrait conduire à un appauvrissement des représentations spatiales.

En serait-il de même si le stylo cédait peu à peu la place au clavier ? C'est un problème qui préoccupe aujourd'hui les pédagogues.

Pourtant, ce n'est pas la première fois que l'écriture se transforme. En fait, elle a été confrontée à la matière dès son origine. Du roseau biseauté qui marquait l'argile, à l'actuel clavier de l'ordinateur, en passant par le plomb du linotypiste et la plume du copiste, l'homme a de tout temps dû inventer, pour écrire, des techniques alliant fonctionnalité et économie (Jean, 1987). Au fil du temps, le geste s'est modifié. Mais aujourd'hui, avec l'usage du clavier et de la souris, il change totalement de *nature*. Sa relation avec l'objet produit (la lettre) devient arbitraire et virtuelle. Ce changement ne concerne-t-il que la forme ou bien touche-t-il à la nature même de l'écrit, à la représentation interne que nous en avons ? Aura-t-il des répercussions sur nos aptitudes à la lecture ?

Tenter de répondre à ces questions, c'est faire l'hypothèse que *notre manière d'écrire influence notre manière de lire*. Cette hypothèse, à partir de laquelle tout ce travail expérimental a été pensé, se situe à l'interface de deux champs de recherche importants des Neurosciences Cognitives :

- celui du rôle cognitif de la motricité,
- et celui de la représentation cérébrale du langage écrit.

Le rôle cognitif de la motricité est postulé par les théories motrices de la perception. Celles-ci seront traitées dans la première partie théorique. Nous y verrons quels sont les domaines dans lesquels la motricité semble jouer un rôle significatif, en particulier celui des représentations spatiales. Conformément aux hypothèses des théories motrices, nous pensons que, s'il existe effectivement dans la lecture un processus influencé par la motricité graphique, celui-ci devrait être un processus perceptif de « bas niveau », mis en jeu au moment de la reconnaissance des lettres, c'est à dire au moment de cette étape initiale de la lecture où des traits sur une feuille de papier doivent être identifiés comme des caractères alphabétiques. Nos investigations ont donc porté sur le rôle de la motricité de l'écriture dans la perception visuelle de lettres.

La représentation cérébrale du langage écrit, et donc plus précisément des lettres qui le composent, a logiquement été l'objet de la seconde partie théorique. Elle sera abordée d'une manière « classique », c'est à dire en distinguant les processus perceptifs impliqués dans la lecture et les processus moteurs impliqués dans l'écriture.

La troisième partie théorique est à la croisée des deux premières : nous y décrirons les études qui ont tenté d'établir des liens entre lecture et écriture. Il ne s'agissait pas de faire une revue détaillée de la littérature sur une question précise, mais de rassembler des arguments provenant de divers domaines, abordés avec diverses méthodologies, pour étayer notre hypothèse.

Parce que la question posée était nouvelle, nous l'avons abordée sur deux fronts. Nous expliciterons ces choix, les questions spécifiquement posées et les résultats que nous avons obtenus dans une partie expérimentale constituée de trois sections : la première relatera une approche neurofonctionnelle (Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle) et la seconde, une approche comportementale mise en œuvre avec de jeunes enfants. La troisième décrira une expérience qui est encore en cours, mais que nous avons choisi de présenter car elle constitue une synthèse des deux approches précédentes, et est donc leur aboutissement. Le lecteur sera guidé d'une section à l'autre, afin qu'il puisse (en tous cas nous l'espérons !) suivre notre démarche depuis son origine jusqu'à son état actuel.

Les réflexions plus générales et les perspectives amenées par nos résultats concluront ce manuscrit.

INTRODUCTION

I. Théorie(s) motrice(s) de la perception : genèse et conditions de mise en jeu des interactions perceptivo-motrices

I.A. Généralités

On peut qualifier de « théorie motrice de la perception » tout courant de pensée qui attribue d'une manière ou d'une autre à la motricité un rôle important dans la structuration et l'interprétation de nos perceptions. Cette idée, dans sa formulation générale, est loin d'être récente, comme le souligne Viviani dans son historique (1990). Mais elle semble avoir connu plus ou moins de crédit selon les périodes, dans l'histoire de l'étude du comportement. La conception qui intégrait le mouvement à la perception était même prédominante, jusqu'à la période de l'entre-deux guerres mondiales, période au cours de laquelle la séparation entre la psychologie, avec les théories dominantes qu'étaient le gestaltisme ou le behaviorisme, et la physiologie, a conduit à dissocier les approches méthodologiques et conceptuelles relatives à la perception et à la motricité, et à négliger leurs relations fonctionnelles. Depuis, les théories motrices ont connu un certain renouveau, grâce à des résultats expérimentaux que nous allons exposer.

Dans la même revue, Viviani introduit le terme « d'*interactions perceptivo-motrices* » pour désigner l'ensemble des phénomènes décrits par les théories motrices. Nous avons choisi d'utiliser ce terme de la même manière, bien qu'il prête un peu à confusion : en effet, il implique une action réciproque. Or, ce qui va nous importer dans cette première partie théorique, c'est davantage de démontrer un effet unilatéral de la motricité sur la perception, et non l'inverse. En fait, dans sa formulation anglaise originale, « motor-perceptual interactions », l'expression est plus explicite car elle indique mieux que ce sont les connaissances motrices qui vont venir interagir avec la structure de la perception. Interaction doit donc être compris dans le sens d'interférence.

Dans leur article de synthèse, Viviani et Stucchi (1992b) distinguent plusieurs niveaux d'intervention de la motricité dans les processus perceptifs : au plus bas niveau, ils constatent que la plupart des entrées sensorielles s'accompagnent d'une activité motrice. Ce sont en effet nos mouvements qui nous permettent d'orienter nos organes sensoriels vers la source de la stimulation (Paillard, 1971). Dans ce cadre, le système moteur coopère avec les systèmes sensoriels pour rendre possible la perception. A un autre niveau, qu'ils appellent le « niveau

de l'attente », ils font référence à l'hypothèse de la copie d'efférence d'Helmholtz (1867), définie comme une copie des commandes motrices destinées aux muscles qui permettrait de « prévenir » les structures sensorielles de l'action projetée. La copie d'efférence rend possible l'anticipation des conséquences sensorielles de l'action : elle offre un exemple où la motricité vient modifier la perception à sa source.

Pourtant, dans les deux exemples évoqués ci-dessus, les interactions perceptivo-motrices apparaissent dans un contexte où une action est, sinon exécutée, au moins préparée. Il existe un autre niveau, qualifié de « plus abstrait » par Viviani et Stucchi (1992b), dans lequel l'information motrice pertinente est rendue disponible indépendamment d'une quelconque intention de bouger. Ce ne sont plus des mouvements réels qui vont intervenir dans la perception, mais des *mouvements potentiels*. C'est sur ce dernier niveau que portent nos hypothèses de travail. Nous allons tenter de le préciser et de l'illustrer par des arguments expérimentaux concrets dans ce qui suit. A l'intérieur même de ce niveau d'interaction, il nous a semblé que les théories motrices se divisaient en deux catégories selon qu'elles impliquent les connaissances motrices dans la *perception du mouvement* ou dans les *perceptions spatiales*. Ces deux catégories se distinguent fondamentalement par l'origine ontogénétique supposée des interactions. En effet, elles sont considérées comme déterminées génétiquement dans le premier cas, et mises en place par les relations du sujet avec son environnement dans le second. Notre approche des interactions perceptivo-motrices dans le domaine de l'écrit se situera dans la seconde catégorie, c'est à dire dans le champ des perceptions de l'espace. Cependant il nous a paru important d'exposer également les résultats acquis dans le domaine de la perception du mouvement, d'abord par souci d'apporter une vue relativement complète des théories motrices, et ensuite parce que cet exposé nous permettra d'amener le lecteur à la position théorique que nous avons adoptée tout au long de ce travail expérimental, en évitant (nous l'espérons) toute confusion dans son esprit.

Notons enfin que nous nous référerons la plupart du temps aux relations entre perception visuelle et mouvement, comme il est l'objet de cette thèse, sauf lorsque nous aborderons la théorie motrice de la perception de la parole.

On retiendra particulièrement l'apport de Paolo Viviani et son équipe dans la synthèse des idées relatives aux interactions perceptivo-motrices, surtout dans la perception du mouvement. La réflexion sur le rôle du mouvement dans la mise en place des représentations spatiales a quant à elle largement été initiée par Jacques Paillard. Concernant les bases physiologiques des interactions, une grande part des données disponibles actuellement provient des études menées depuis plus de 20 ans par Giacomo Rizzolatti et son équipe sur les

propriétés motrices, mais aussi perceptives et cognitives des neurones situées dans des subdivisions du cortex prémoteur du singe, équivalent aux aires 6 et 44 de Brodmann de l'homme (voir figure 1). Ces régions semblent, comme nous le verrons, avoir une importance fondamentale dans notre capacité à interpréter le monde qui nous entoure par référence à notre propre motricité.

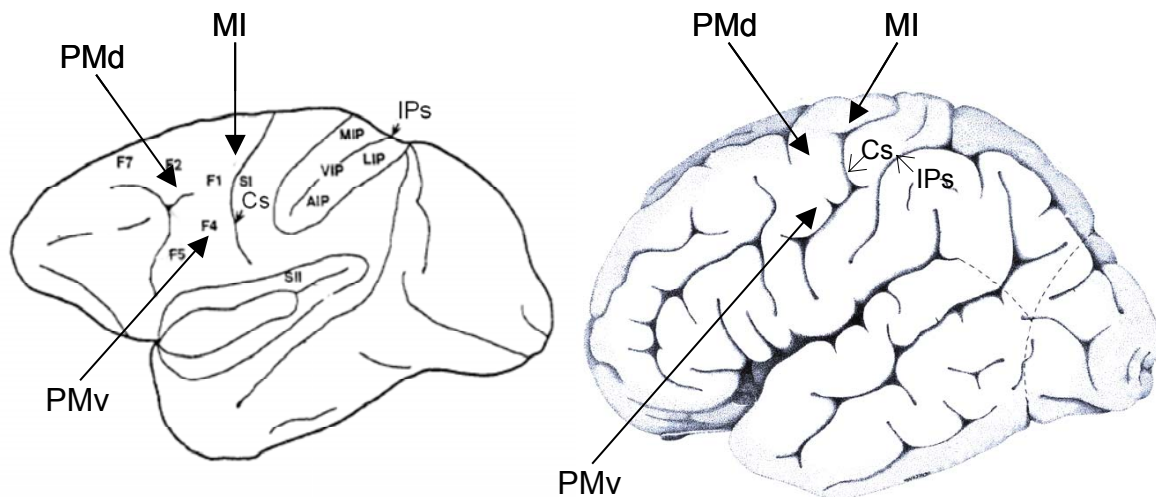


Figure 1. Faces latérales d'un cerveau de singe (à gauche) et d'homme (à droite) montrant certaines régions impliquées dans des interactions perceptivo-motrices

Chez le singe, le cortex moteur est subdivisé en plusieurs régions, de F1 à F7, correspondant aux aires 4, 6 et 44 de l'homme, en avant du sillon central (Cs). Chez le singe, le sillon intrapariétal (IPs), contient plusieurs régions (Médiale, Ventrale, Latérale et Antérieure)

PMv = Cortex Prémoteur Ventral PMd = Cortex Prémoteur Dorsal MI = Cortex Moteur Primaire
D'après Picard et Strick, 2001, et Fagg et Arbib, 1998.

I.B. Interactions perceptivo-motrices dans la perception du mouvement

Ces interactions sont classiquement considérées comme présentes dès la naissance, ne nécessitant pas d'apprentissage mais tout au plus une maturation des structures neurales sous-jacentes.

1. Loïs de mouvement et perception du mouvement biologique

Johansson, en 1973, a été parmi les premiers à objectiver l'étonnante sensibilité du système visuel humain au mouvement biologique. Il a filmé des acteurs marchant, courant ou dansant dans le noir avec seulement quelques points lumineux fixés aux articulations principales. Ces stimuli sont reconnus systématiquement comme des êtres humains en mouvement par tous les sujets, même avec très peu de points (de 5 à 10) et lorsque les conditions de présentation sont manipulées (présentation très brève, soustraction d'une composante du mouvement...). Il faut noter que cette compétence est présente chez de très jeunes enfants (36 semaines, Bertenthal et al., 1985), ce qui amène à penser qu'elle ne résulte pas d'un apprentissage perceptif.

Dans ce cadre, ce que Viviani et ses collaborateurs ont démontré, c'est que cette prédisposition très particulière à détecter le mouvement biologique repose sur la mise en jeu des propriétés intrinsèques du système moteur. Plus précisément, ils ont établi que la perception d'une trajectoire représentée par un point lumineux en mouvement est contrainte par les « compétences motrices implicites » du sujet. Pour cela, ces auteurs se sont basés sur l'existence d'une loi liant vitesse et rayon de courbure de la trajectoire des mouvements humains : il y a accélération dans les parties rectilignes de la trajectoire et décélération dans les parties courbes. Cette relation, mise en évidence pour les mouvements bidimensionnels de la main (Lacquaniti et al., 1983; Viviani & Terzuolo, 1982) a été retrouvée par la suite pour les mouvements de poursuite oculaire (De'Sperati & Viviani, 1997). Elle est interprétée comme la manifestation de mécanismes centraux de contrôle du mouvement. Appliquée à la cinématique d'un point lumineux, elle a des conséquences sur la trajectoire perçue et peut ainsi servir à tester l'hypothèse d'interactions perceptivo-motrices dans la perception visuelle du mouvement biologique. Il est en effet possible de faire varier indépendamment la forme de la trajectoire et la cinématique du point en mouvement et d'observer les effets de ces manipulations sur le percept résultant. Cette stratégie a été appliquée dans deux séries d'expériences portant sur la perception visuelle de trajectoires elliptiques. Au cours de la première (Viviani & Stucchi, 1989), les auteurs ont fixé trois cinématiques « naturelles » possibles : soit celle d'un cercle (vitesse constante), soit celle d'une ellipse horizontale, soit celle d'une ellipse verticale. En appliquant ces trois cinématiques sur des cercles et des ellipses de différentes excentricités, ils ont établi que la perception subjective de la circularité est biaisée lorsque la correspondance entre la cinématique et la forme ne respecte pas la loi de mouvement liant vitesse et courbure. Par exemple lorsqu'un point décrit une trajectoire elliptique à vitesse constante, celle-ci est perçue comme un cercle. Inversement, si le point décrit un cercle mais accélère en deux points opposés de la trajectoire, il sera perçu comme une ellipse. Dans une deuxième série d'expériences (Viviani & Stucchi, 1992a), c'est la forme

des trajectoires qui a été fixée. Les sujets avaient pour tâche de faire varier la cinématique du point jusqu'à obtenir une vitesse constante. En fait, les résultats montrent qu'est perçue comme constante et uniforme une vitesse qui respecte les lois du mouvement biologique. Au contraire, si la vitesse des stimuli est constante, elle est perçue comme non uniforme.

Les illusions visuelles mises en évidence dans ces deux séries d'expériences peuvent être interprétées comme un premier exemple d'interactions perceptivo-motrices : les connaissances que nous avons de nos propres mouvements contraignent nos perceptions visuelles.

2. Perception d'actions significantes

a. La théorie motrice de la perception de la parole (TMPP)

La TMPP postule l'intervention d'une information de nature motrice dans la perception du langage parlé. Elle a beaucoup influencé les réflexions sur les interactions perceptivo-motrices.

Cette théorie est parue dans sa première version en 1967 (Liberman et al., 1967), puis sous une forme révisée en 1985 (Liberman & Mattingly, 1985). Elle vise à expliciter la manière dont nous sommes capables de dégager une structure phonétique cohérente, sur la base d'un signal acoustique particulier qu'est la parole. En effet, des signaux verbaux physiquement différents peuvent conduire à l'émergence d'un percept invariant : le 'p' est reconnu en tant que phonème [p] dans les syllabes [pa] et [pi], malgré des variations fréquentielles différentes dans les deux cas. Il est donc nécessaire que l'auditeur puisse trouver dans le signal de parole une unité invariante sur laquelle baser sa catégorisation. Ces unités ne pouvant être trouvées à la surface acoustique, les auteurs en ont déduit qu'elles devaient être recherchées dans les processus moteurs qui permettent de produire le son. Mais quels sont exactement ces invariants moteurs évoqués par Liberman et ses collaborateurs ? En fait, ils ne doivent pas être appréhendés comme des mouvements périphériques (qui sont variables), mais comme des objets plus « éloignés », émergeant des structures neurales qui contrôlent le mouvement. Plus précisément, ces objets seraient les intentions motrices du locuteur.

L'un des phénomènes les plus cités à l'appui de la TMPP est l'effet Mc Gurk (McGurk & MacDonald, 1976). Cet effet s'observe typiquement lorsque l'on présente à un sujet deux stimuli verbaux conflictuels, l'un auditif et l'autre visuel (une vidéo où l'acteur prononce un

son qui ne correspond pas à celui entendu). Ces deux entrées (par exemple [ba] et [ga]) sont fusionnées en un percept intermédiaire ([da]). Le sujet n'a pas conscience que le stimulus est bimodal, et pense vraiment avoir entendu le son [da]. Pour les auteurs de la TMPP, cette illusion s'explique par le fait que dans les deux cas, le sujet perçoit des intentions gestuelles, et qu'il n'y a pas de différence de nature entre les deux stimuli perçus. Notons qu'il existe un corrélat de l'effet Mc Gurk chez les jeunes enfants : des bébés de 4 ou 5 mois préfèrent regarder un visage qui prononce la voyelle qui correspond à celle qu'ils entendent (Kuhl & Meltzoff, 1982). Ce dernier résultat, ajouté au fait que les très jeunes enfants sont capables de catégoriser les sons de parole (Eimas et al., 1971) sont des arguments utilisés par Liberman et Mattingly (1985) dans la version révisée de la TMPP pour étayer l'hypothèse de la nature innée des processus moteurs mis en jeu dans la perception de la parole.

Pour résumer brièvement la TMPP, on peut dire qu'elle conçoit la perception de la parole comme résultant de l'action d'un module phonétique spécifié génétiquement qui extrait du signal auditif de parole des invariants moteurs pour les traduire automatiquement en unités phonétiques. Plus simplement, nous percevrions le signal de parole par référence à nos propres capacités de production.

b. Le système miroir

L'idée selon laquelle nos propres connaissances motrices sont utilisées pour reconnaître et interpréter les mouvements des autres a aussi été avancée plus récemment suite à des études électrophysiologiques chez le singe qui ont mis en lumière les propriétés de réponse des neurones de l'aire F5 (voir figure 1) du cortex prémoteur à des mouvements perçus visuellement. Ces « neurones miroir » déchargent à la fois lorsque le singe exécute une action particulière et lorsqu'il observe un autre individu (singe ou humain) exécuter la même action (Gallese et al., 1996). Le même type de résultat a été par la suite mis en évidence chez l'homme grâce à diverses techniques d'imagerie cérébrale (Buccino et al., 2001; Fadiga et al., 1995; Hari et al., 1998; Rizzolatti et al., 1996). Le système miroir apparaît donc comme un mécanisme cortical qui lie l'observation et l'exécution d'actions motrices. Cependant, à la différence des hypothèses de Viviani et collaborateurs évoquées ci-dessus, motricité et perception n'interagiraient ici pas par l'intermédiaire de lois générales de mouvement, mais à travers des représentations de mouvements spécifiques. En effet, chaque neurone miroir répond sélectivement pour une action particulière (Gallese et al., 1996) : il existe des neurones

de « grasping », de « holding », de « manipulating »... La seconde différence notable est que le système miroir n'est pas sensible à tous les mouvements mais seulement aux actions définies par un but, c'est à dire motivées par une intention particulière.

Cette découverte a eu depuis un retentissement considérable dans la communauté neuroscientifique internationale et donné lieu à un nombre impressionnant de travaux qui ont en particulier impliqué le système miroir dans les comportements d'imitation (Gallese & Goldman, 1998; Nishitani & Hari, 2000; Rizzolatti & Luppino, 2001) ainsi que dans l'attribution d'états mentaux et d'intentions à autrui (théorie de la simulation, Blakemore & Decety, 2001; Gallese & Goldman, 1998). Nous ne nous étendrons pas sur cette littérature, qui ne touche que partiellement à notre thématique. Retenons simplement que dans sa définition initiale, le système miroir est un autre exemple éloquent d'interactions perceptivo-motrices, cette fois-ci appuyé par des données neurophysiologiques. Notons pour finir qu'il a été avancé que l'homologue chez l'homme de l'aire F5 du cortex prémoteur qui contient les neurones miroir chez le singe serait l'aire de Broca (Rizzolatti & Arbib, 1998). Il est donc tentant, étant données les propriétés fonctionnelles des neurones miroir, de spéculer sur leur rôle dans la communication interindividuelle et donc dans le langage (Gallese et al., 1996; Rizzolatti & Arbib, 1998). Cette vision se rapproche de celle des tenants de la TMPP. Notons d'ailleurs que certains neurones-miroir répondent aux sons systématiquement associés à des actions particulières (Kohler et al., 2002).

I.C. Interactions perceptivo-motrices et représentations spatiales

1. Ontogenèse : le dialogue sensorimoteur

Parce que nos organes sensoriels sont portés par notre corps, chacun de nos mouvements va provoquer une modification du flux d'entrée sensorielle. Au cours de l'ontogenèse, ce phénomène sera utilisé pour mettre en correspondance systématique un/des percept(s) avec un/des mouvement(s) et ainsi permettre la mise en place des représentations spatiales (Paillard, 1971; Paillard, 1999). Ce processus a depuis longtemps été mis en évidence dans les premiers mois du développement par Piaget, qui, avec la notion de schèmes sensori-moteurs, a souligné l'importance pour le bébé de transformer par des actions motrices l'ordre spatial du monde extérieur, pour en dégager la structure, la cohérence et les propriétés invariantes, ainsi que pour comprendre les relations causales qui lient deux événements, et plus tard à accéder à

des modes de raisonnement complexes (Piaget, 1948). Ainsi, dès les premières semaines de la vie, l'enfant va spontanément apprendre à donner du sens à son environnement par les actions qu'il y opère. Selon Paillard (1971), cette tendance naturelle est une conséquence de la conformation de notre appareil moteur qui va, par l'étendue limitée des mouvements possibles et la position qu'y tiennent des organes sensoriels de « capture », imposer un certain type de relations entre le sujet et l'espace. Imaginons que nous ne puissions pas nous déplacer dans notre environnement, ni interagir avec les objets qui le composent : nous n'aurions certainement pas la même représentation du monde qui nous entoure (Gallese, 2000). Held et Hein, en 1963, furent les premiers à apporter des preuves expérimentales concrètes à cette idée dans leur expérience désormais classique d'élevage de chatons dans des conditions de restriction motrice. Des chatons étaient élevés par paires dans l'obscurité. Trois heures par jour, ils étaient placés dans un environnement visuel contrôlé, dans un manège. L'un des chatons de la paire, attelé à l'une des branches du manège, entraînait dans ses déplacements le second chaton, suspendu dans une nacelle à la branche opposée du manège.

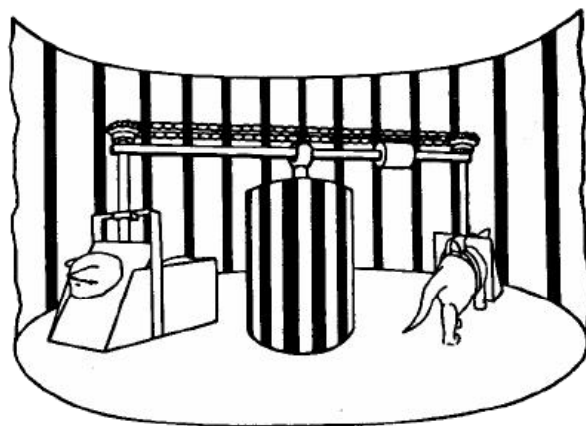


Figure 2. Dispositif expérimental, dans l'expérience de Held et Hein (1963)

Le chaton actif (à droite), attelé à une des branches du manège, entraînait dans ses déplacements le chaton passif, porté dans une nacelle.

L'information visuelle reçue était donc la même pour les deux chatons, mais dans un cas elle variait en fonction de mouvements effectivement réalisés dans l'environnement visuel, tandis que dans l'autre elle était acquise sans mouvement (voir figure 2). Par la suite, alors que le chaton actif avait des réactions visuo-guidées bien coordonnées, le second chaton se comportait dans son environnement comme s'il était aveugle. Les deux chatons d'une paire donnée ayant un pool génétique comparable (ils provenaient de la même portée), les

différences de développement des fonctions visuelles obtenues ne s'expliquent que par la présence ou non d'une activité motrice d'exploration de l'espace. Held et Hein concluent que le développement des représentations spatiales nécessite une variation de l'entrée sensorielle concordant systématiquement avec les mouvements produits activement par le sujet. Il résulte donc d'une sorte d'apprentissage implicite. Il faut noter que ces processus ne sont pas qu'un produit du développement ontogénétique mais peuvent aussi se manifester chez des adultes, comme le démontrent les expériences de substitution tactile à la vision chez des aveugles (White et al., 1970). En effet, lorsque l'image donnée par une caméra était digitalisée et projetée sur la peau grâce à une matrice de stimulations tactiles, les vibrations perçues ne prenaient de sens que lorsque les sujets apprenaient à manipuler eux-mêmes la caméra.

Selon Paillard (1971), l'action de la motricité s'exerce sur deux pans distincts des représentations spatiales : « L'appropriation de l'espace semble relever d'un double système moteur : le premier s'exprime dans les activités de positionnement de transport du corps et de ses segments ; ces activités (...) conduisent à l'édification d'un *espace des lieux*. Le second concerne les activités de saisie, de manipulation, de transformation des objets ou singularités qui peuplent l'espace des lieux ; ces activités (...) conduisent à la reconnaissance des *objets et des formes spatiales*. ». Nous reprendrons cette dichotomie dans l'exposé des interactions perceptivo-motrices relatives à l'espace. Ce que nous tenterons d'établir dans les paragraphes qui vont suivre, c'est que ce « dialogue sensorimoteur » (dans les termes de Paillard) va marquer les structures neurales impliquées de telle manière que, par la suite, les mouvements mis en jeu au cours de l'acquisition deviendront partie intégrante de la connaissance de l'espace, et seront évoqués dans des situations purement perceptives.

2. Espace des lieux : codage de l'espace péripersonnel

Dans sa réflexion sur les distinctions entre espace géométrique et espace représentatif, Poincaré (1905) écrivait : « Quand on dit d'autre part que nous 'localisons' tel objet en tel point de l'espace, qu'est-ce que cela veut dire ? Cela signifie simplement que nous nous représentons les mouvements qu'il faut faire pour atteindre cet objet. »

Parmi toutes les distinctions suggérées à propos de l'espace des lieux, il a en effet été établi de manière intéressante que nous ne nous représentons pas de la même manière l'espace proche (espace péripersonnel) et l'espace lointain. Cette dichotomie avait été évoquée par Mountcastle et coll. (1975) suite à une étude électrophysiologique des propriétés des neurones

du lobule pariétal inférieur : certains neurones de cette région, qualifiés de « neurones de fixation ou de poursuite visuelle », répondaient à l'apparition d'un stimulus visuel ayant une valeur motivationnelle pour le singe, mais seulement lorsque ce stimulus se situait dans l'espace de saisie potentielle. Chez l'homme, un cas neurologique présentant une dissociation dans l'atteinte de ces deux systèmes a été rapporté (Halligan & Marshall, 1991) : suite à une lésion pariétale droite, ce patient présentait une hémignégligence gauche sélective à l'espace proche, tandis que l'espace lointain était perçu correctement. La dissociation inverse a été décrite par la suite (Vuilleumier et al., 1998).

Certaines données indiquent que des aires prémotrices participeraient à cette distinction en jouant un rôle important dans le codage de l'espace péripersonnel. Chez le singe, des neurones de l'aire F4, aire du cortex prémoteur recevant des informations du cortex pariétal et du cortex somesthésique secondaire et impliquée dans les mouvements d'atteinte (Rizzolatti et al., 2002), répondent également à des stimuli soit somesthésiques soit visuels (neurones bimodaux). Les champs récepteurs de ces cellules sont ancrés sur un segment corporel donné (en particulier le bras ou le visage) et leurs champs récepteurs visuels s'étendent à l'espace immédiatement adjacent à ce segment (voir figure 3).

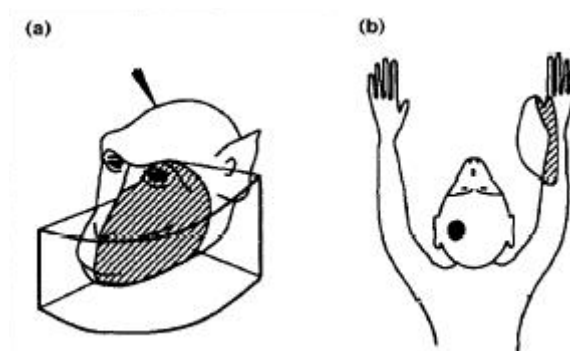


Figure 3. Champs récepteurs de deux neurones bimodaux (tactiles-visuels)

a. Le champ récepteur tactile (hachuré) couvre la partie gauche de la face, controlatérale au neurone enregistré. Autour, sur un rayon d'environ 10 cm, se trouve le champ récepteur visuel.

b. Les champs récepteurs tactile et visuel, sont situés sur et autour de la main et du bras controlatéraux au neurone enregistré.

D'après Rizzolatti et al, 2002.

D'autre part, lorsque les yeux bougent, les champs récepteurs ne se déplacent pas et restent ancrés sur la position du segment (Fogassi et al., 1996). Une lésion de l'aire F4 entraîne, outre des déficits dans les comportements moteurs d'atteinte en utilisant la main controlatérale ou la bouche, une sévère hémiparésie visuelle qui reste limitée à l'espace péripersonnel controlatéral (Rizzolatti et al., 1983). En complément de ces données, une étude plus récente montre que les neurones de F4 codent préférentiellement une direction de l'espace, ceci indépendamment de la posture du segment corporel sur lequel leurs champs récepteurs sont centrés (« extrinsic-like neurons », Kakei et al., 2001). On peut donc conclure que les neurones de l'aire F4 sont impliqués dans le codage des localisations dans l'espace proche dans un système de coordonnées extrinsèque (Graziano & Gross, 1998; Rizzolatti et al., 1997 ; Rizzolatti et al., 2002). Ce codage n'est pas dépendant de la vision : en effet certains neurones bimodaux répondent lorsque l'animal est dans l'obscurité complète, mais qu'il sait qu'un objet se trouve à sa proximité (Graziano et al., 1997). Chez l'homme, une étude en TEP a permis de confirmer ces données en dissociant les bases neurales de la représentation des espaces péripersonnel et lointain, dans une tâche de bisection de ligne (Weiss et al., 2000). La réalisation de la tâche, qui consiste à trouver le point qui sépare la ligne en deux segments égaux, sur un écran placé dans l'espace proche induit des activations dans le cortex prémoteur, le sillon intrapariétal et le thalamus. Ces activations sont absentes lorsque la tâche est rigoureusement la même, mais porte sur un tableau situé dans l'espace lointain. Ainsi, la différenciation entre espaces proche et lointain se ferait en partie sur la base de processus moteurs implicites : l'espace proche se caractérise par le fait qu'il est *potentiellement accessible*, saisissable par le mouvement d'un segment corporel donné, tandis que l'espace lointain est hors de portée.

3. Espace des objets

Bergson écrivait dans son ouvrage sur la mémoire : « Reconnaître un objet usuel consiste surtout à savoir s'en servir. (...) Mais savoir s'en servir, c'est déjà esquisser les mouvements qui s'y adaptent, c'est prendre une certaine attitude ou tout au moins y tendre par l'effet de ce que les allemands ont appelé des 'impulsions motrices'. » (Bergson, 1939, p101). Nous allons voir que cette affirmation est désormais largement admise.

a. Dissociations neuropsychologiques

En fait, tous les objets ne sont pas représentés de la même manière par le cerveau. En effet, lors de lésions cérébrales, il arrive que les patients deviennent incapables de reconnaître visuellement certaines catégories d'objets. Une telle dissociation a été décrite précisément par Warrington et Shallice (Warrington & Shallice, 1984) dans une étude sur 4 patients en phase de récupération de l'*herpes simplex encephalitis*, maladie affectant les structures des lobes temporaux. Ces patients, bien qu'atteints à divers degrés, présentaient tous exactement le même type d'agnosie visuelle associative (c'est à dire touchant les connaissances sémantiques en l'absence de trouble perceptif). Alors qu'ils éprouvaient d'énormes difficultés dans toutes les tâches sémantiques portant sur des objets « naturels » ou « vivants » (fruits, animaux, nourriture...) sur présentation visuelle ou verbale, la reconnaissance des objets « inanimés », c'est à dire en fait tous les objets construits de la main de l'homme (artéfacts) était complètement préservée. Il existait des exceptions comme les pierres précieuses qui n'étaient pas du tout reconnues, tandis que les parties du corps étaient identifiées sans erreur. Warrington et Shallice ont à l'époque émis l'hypothèse d'une organisation générale de la connaissance sur les objets basée sur leurs attributs les plus saillants : alors que les artéfacts (et dans une certaine mesure les parties du corps) se distinguent le plus souvent par leurs attributs fonctionnels, de tels attributs ne sont pas pertinents pour distinguer une pomme d'une orange. Les objets « vivants » se distinguent davantage par des différences physiques (couleur, texture...). C'est aussi le cas des pierres précieuses. Ces idées ont été rediscutées et précisées quelques années plus tard avec la description d'une patiente présentant la dissociation inverse (Warrington & McCarthy, 1987). Une incapacité sélective à reconnaître les objets de type artéfacts ainsi que les parties du corps était apparue suite à une lésion centrale gauche, en plus d'une hémiparésie droite et d'une dysphasie sévère. En poussant l'investigation, Warrington et McCarthy se sont aperçues que le déficit était encore plus spécifique : il était beaucoup plus marqué pour les petits objets manipulables, les parties du corps et les meubles que pour les gros objets typiquement extérieurs comme les constructions, les véhicules... Ainsi, les troubles ne pouvaient plus s'expliquer directement par une distinction stricte et sans doute simpliste entre attributs physiques et fonctionnels des objets. Warrington et McCarthy affinèrent donc leur interprétation : les représentations cérébrales permettant la catégorisation des objets et des concepts se mettraient en place sur la base d'une pondération de l'information provenant des différents canaux sensoriels et moteurs sollicités

au cours de l'apprentissage. Chez la patiente décrite, plus qu'une perte de la représentation des objets manipulables, c'était une perte des informations motrices associées qui était explicative des symptômes et de leur spécificité. Dans ce cadre il est intéressant de citer deux observations (Magnié et al., 1999; Sirigu et al., 1991) qui montrent que ce sont les connaissances motrices en elles mêmes plutôt que les attributs de fonction qui entrent dans la représentation. Ces deux cas avaient des déficits assez similaires à ceux des premiers patients de Warrington et Shallice (1984) : ils avaient moins de difficultés à reconnaître les objets manipulables comme les outils. Ces études se sont focalisées sur le fait qu'ils gardaient des compétences parfaites pour manipuler les objets : il existait une dissociation entre les connaissances sur la manipulation et l'action associée à l'objet qui étaient préservées et les connaissances sur sa fonction qui étaient dégradées. Cela pouvait se traduire par la prise en main adéquate d'un objet mais son utilisation dans un contexte erroné. Néanmoins, les connaissances sensorimotrices conservées permettaient parfois de reconnaître certains objets, surtout lorsqu'ils étaient manipulés simultanément. La figure 4 présente des dessins de mémoire de l'un de ces patients. Les auteurs rapportent que pour dessiner la guitare, le patient s'arrêtait fréquemment et mimait son utilisation : en effet il était guitariste et l'amorçage apporté par la réalisation des mouvements suffisait à retrouver la forme précise de l'instrument en mémoire.

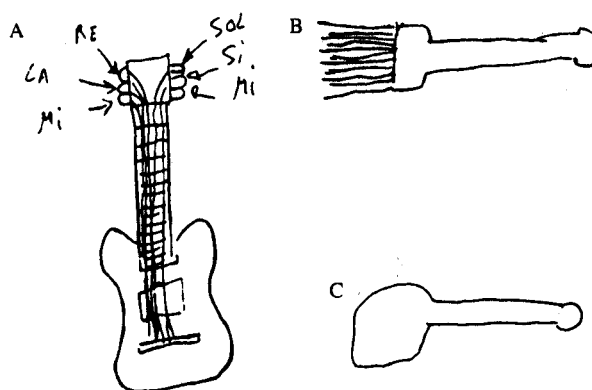


Figure 4. Dessins de mémoire réalisés par le patient FB (Sirigu et al., 1991)

A. Guitare B. Fourchette C. Marteau

Les habiletés graphiques étaient préservées mais le patient avait des difficultés à retrouver la forme des objets en mémoire, excepté pour la guitare, instrument qu'il pratiquait et auquel il parvenait à associer des gestes spécifiques.

Retenons donc que les méthodes de la neuropsychologie ont mis en évidence le lien étroit entre les représentations de certaines catégories d'objets et les connaissances motrices associées.

b. Le système « canonique »

Si l'on considère que l'hypothèse neuropsychologique à propos de la représentation centrale des objets est correcte, trois questions se posent : d'abord le codage sensorimoteur des objets est-il mis en jeu chez des sujets normaux ? Ensuite, si oui, quelles en sont les bases neurales ? Et enfin, quel type d'information motrice va participer à cette représentation ?

Ce sont encore des études électrophysiologiques chez le singe éveillé qui ont initié des réponses concrètes à ces questions. Nous avons mentionné plus haut le système miroir, situé dans l'aire F5 du cortex prémoteur. Un autre type de neurones (neurones « visuomoteurs » ou « canoniques ») enregistrés dans cette même aire et impliqués dans les mouvements d'interaction avec les objets, a aussi des propriétés visuelles cette fois en rapport non pas avec la vision des mouvements eux-mêmes, mais avec la vision des objets seuls (Murata et al., 1997). La plupart de ces neurones visuomoteurs déchargent sélectivement pour un objet ou une sous-catégorie d'objets associés à un même type de mouvements, dans des conditions de fixation visuelle, alors que le singe ne planifie pas de mouvement vers l'objet. Souvent, un neurone donné déchargera à la fois lorsque le singe voit un objet et lorsqu'il manipule ce même objet. L'ensemble de ces propriétés de réponse visuelle sélectives permet aux auteurs d'affirmer que l'activité des neurones canoniques n'est pas reliée à des facteurs attentionnels ou à l'intention d'agir, mais qu'elle « représente une description de l'objet en termes moteurs ». Cette interprétation se distingue sensiblement de la dichotomie classique des systèmes de projection des voies visuelles en voie dorsale pour l'action / voie ventrale pour la perception (Goodale & Milner, 1992). En effet, Goodale et Milner postulent que le type d'analyse exécuté sur l'objet dépend du contexte, la mise en jeu de la voie dorsale étant fortement contrainte par la planification d'une action. Or les observations de Murata et coll. montrent que les attributs des objets présentés sont *automatiquement* traduits en actions potentielles, en dehors de toute intention de bouger. Des réponses assez similaires de neurones à des stimuli visuels ont été rapportées à d'autres niveaux de la voie dorsale, en particulier dans le cortex pariétal postérieur (aire AIP, voir figure 1 ; Taira et al., 1990). L'aire AIP est étroitement connectée avec l'aire F5 et contient une forte concentration de neurones

impliqués dans les mouvements de manipulation de la main (Jeannerod et al., 1995 ; Rizzolatti & Luppino, 2001). Ceci semble indiquer que des composantes de la voie dorsale décrite par Goodale et Milner sont mises en jeu dans des situations d'identification perceptive d'objets. A la suite de ces observations, l'équivalent chez l'homme du réseau AIP-F5 a été décrit dans une situation de reconnaissance visuelle d'objets en IRMf pour la première fois par Chao et Martin (Chao & Martin, 2000). Leur étude est remarquable car elle intègre parfaitement la notion de spécificité catégorielle mise en évidence en neuropsychologie et les connaissances relatives aux substrats neuroanatomiques décrits chez le singe. Dans cette expérience, les activations cérébrales générées par la perception visuelle d'images d'outils ont été contrastées avec les activations générées par des images d'animaux, de visages ou de bâtiments. Que ce soit en perception visuelle passive ou en dénomination silencieuse, les images d'outils activent sélectivement le cortex prémoteur ventral et le cortex pariétal postérieur. Il faut noter que les activations sont exclusivement latéralisées dans l'hémisphère gauche. Pour Chao et Martin, elles sont dues au rappel des mouvements des doigts et de la main droite associés à l'utilisation des objets manipulables. Ces interprétations suscitent un intérêt croissant et plusieurs études ont suivi l'expérience de Chao et Martin. L'implication sélective du réseau pariéto-prémoteur a été confirmée dans différentes conditions impliquant des objets manipulables (mise en mémoire à court terme, jugements d'actions associées ou de fonctions, catégorisation ; respectivement Mecklinger et al., 2002; Kellenbach, 2003; Gerlach et al., 2002).

Mais quelle est exactement la nature des représentations motrices mises en jeu dans la reconnaissance d'objets manipulables ? Les neurones de AIP ont été groupés en trois classes : les neurones visuel-dominants qui répondent à l'action réalisée dans la lumière et à la vision de l'objet, les neurones moteur-dominants qui répondent à l'action réalisée dans le noir ou à la lumière mais pas à l'objet seul et les neurones visuels et moteurs qui répondent dans toutes les conditions mais davantage à la lumière (Jeannerod et al., 1995; Taira et al., 1990). D'autre part, beaucoup de ces neurones répondent spécifiquement pour un objet ou un groupe d'objets et certains sont sélectifs à l'orientation du stimulus (Murata et al., 2000). Enfin, les neurones pariéto-moteurs semblent coder la totalité de l'action de saisie puisqu'ils déchargent continuellement à la fois pendant la préformation de la main et la manipulation (Taira et al., 1990). Ceci contraste avec les neurones de F5 qui peuvent coder toute l'action, mais également des segments plus restreints (par exemple une configuration particulière des doigts, Jeannerod et al., 1995; Rizzolatti & Luppino, 2001). Une autre différence entre les propriétés des deux régions est la proportion plus importante de neurones sensibles à des stimuli visuels

dans le cortex pariétal. En fait, les rôles respectifs des aires pariétale postérieure et prémotrice ventrale et leurs interactions ne sont pas encore tout à fait éclaircis. Cependant, les caractéristiques globalement proches des deux régions indiquent leur rôle complémentaire dans les transformations visuomotrices. Alors que le cortex pariétal postérieur permettrait l'analyse des caractéristiques sensorielles de l'objet pertinentes pour l'action (affordances), le cortex prémoteur ventral assurerait la transformation de ces affordances en gestes élémentaires, parfois qualifiés de « prototypes moteurs » (Rizzolatti & Luppino, 2001) ou « schémas » (Arbib, 1981). Les échanges mutuels entre les populations neuronales pariétales et prémotrices ont été évoqués comme le substrat des représentations pragmatiques (Fagg & Arbib, 1998; Jeannerod, 1994), c'est à dire des configurations motrices prédéterminées correspondant aux affordances de l'objet perçu.

c. Imagerie mentale sur des objets tridimensionnels

Les interactions perceptivo-motrices détaillées ci-dessus concernaient la perception d'objets connus. En effet, même dans les expériences d'enregistrement électrophysiologique ayant mis en évidence des réponses visuelles dans la voie dorsale, les animaux étaient entraînés à manipuler les objets tridimensionnels qui servaient de stimuli. Il est probable que la présentation visuelle d'objets inconnus et n'ayant jamais été manipulés ne suscite pas d'activations motrices automatiques dans un contexte neutre, bien qu'à notre connaissance cette question n'ait jamais été traitée directement. Pourtant, il a été démontré grâce à l'imagerie cérébrale que de tels objets inconnus peuvent générer des activations dans le réseau de préhension mentionné précédemment, c'est à dire engager des représentations pragmatiques lorsque la tâche est orientée sur l'analyse visuospatiale de l'objet : c'est le cas de la rotation mentale. Dans la première étude sur la rotation mentale, Shepard et Metzler (1971) avaient trouvé que le temps de réaction augmentait linéairement avec l'angle de rotation des objets, lorsque des sujets avaient à décider si deux objets tridimensionnels présentés dans des orientations différentes étaient identiques ou non. Richter et coll. ont utilisé cette même tâche dans une étude élégante en IRMf, en s'intéressant au rôle des aires motrices associatives (Richter et al., 2000). Ils ont mis au point une méthode d'analyse qui permettait de corrélérer essai par essai le temps de réaction à deux paramètres du signal IRMf : l'onset (le moment du déclenchement) et la largeur. L'onset était corrélé avec le temps de réaction seulement dans l'aire motrice primaire gauche (la réponse était donnée de la main

droite), ce qui montrait que l'activation de cette région était bien dépendante de l'exécution de la réponse. La largeur était corrélée avec le temps de réaction dans l'aire motrice supplémentaire, les lobules pariétaux supérieurs et les cortex prémoteurs bilatéraux : plus le degré de rotation était important, plus l'activité neurale durait longtemps dans les aires motrices associatives. Cet effet semble cependant être susceptible de variations inter-individuelles car il n'est pas trouvé systématiquement chez tous les sujets. La rotation mentale pourrait donc reposer sur des régions cérébrales codant pour le mouvement, tout se passant comme si les sujets s'imaginaient implicitement en train de faire tourner les objets en les manipulant. Les stimuli de Shepard et Metzler ont aussi été utilisés dans une tâche de construction mentale d'objets sur instructions verbales en TEP (Mellet et al., 1996), qui démontre aussi l'implication d'aires motrices associatives. Enfin, des résultats comparables ont été rapportés dans une tâche de rotation mentale de cubes (Lamm et al., 2001) en utilisant en parallèle l'IRMf et les potentiels évoqués. Les résultats montrent que les cortex pariétaux et prémoteurs restent activés pendant toute la durée de la tâche, chez tous les sujets testés. Notons qu'étant donnée l'étendue des activations sur l'ensemble du cortex pré moteur en particulier, d'autres processus moteurs pourraient être également impliqués dans la rotation mentale, notamment, comme l'évoquent les auteurs, ceux reliés aux mouvements des yeux. L'implication prépondérante des processus liés à des mouvements de la main est toutefois confirmée par une étude comportementale qui montre que lorsque la rotation mentale est réalisée en même temps qu'une rotation manuelle réelle, les deux tâches interfèrent nettement lorsque les sens de rotation sont incompatibles (Wexler et al., 1998). Il est intéressant de remarquer que cette fois la tâche portait sur des formes bidimensionnelles. La rotation mentale d'objets constitue donc un autre exemple d'interactions perceptivo-motrices. L'on pourrait d'ailleurs plutôt la qualifier d'interaction « cognitivo-motrice », puisqu'elle montre que la motricité peut intervenir à un niveau plus élevé que dans la simple reconnaissance visuelle.

d. Un cas particulier d'objets : les formes graphiques

Les lettres font partie de l'espace des objets, et c'est en tous cas ainsi qu'elles seront considérées dans l'ensemble de ce travail. Toutefois, elles constituent une classe d'objets tout à fait à part. En tout premier lieu, elles se distinguent des autres objets présents dans l'environnement par leur caractère linguistique, en tant qu'unités constituantes des mots.

Ensuite, au niveau de leur conformation visuelle, elles se présentent généralement uniquement sous une forme bidimensionnelle, plane, et leur orientation est un facteur déterminant pour les discriminer les unes des autres : un « d » n'est pas un « p » ou un « b ». Enfin, le mouvement d'écriture, mouvement qui va permettre de les former, est lui aussi un mouvement très particulier. Il est donc important, avant d'envisager la possibilité d'interactions perceptivo-motrices dans la perception de l'écrit, de bien caractériser d'une part les traitements visuels que va subir une lettre pour être identifiée, et d'autre part, les processus moteurs qui vont permettre de l'écrire.

II. La lettre

II.A. Données sur la perception visuelle de lettres

1. Les étapes initiales de la reconnaissance des mots écrits

La lecture est une habileté cognitive extrêmement complexe qui a beaucoup retenu l'attention des psychologues et des neuroscientifiques depuis plus d'un siècle avec, en 1892, la première description détaillée par Jules Déjerine d'un cas d'alexie pure ou « cécité verbale ». Cette atteinte se traduisait par la perte sélective de la faculté de lire à la suite d'une lésion cérébrale, et Déjerine évoqua l'existence possible d'un centre contenant « les images optiques des lettres » (Déjerine, 1892). Depuis, l'essentiel des recherches a visé à expliquer comment nous sommes capables de reconnaître et de comprendre les mots écrits. Il s'agit essentiellement de préciser comment les différents niveaux de traitement –orthographique, phonologique et sémantique- sont organisés individuellement et articulés entre eux. L'ensemble des données comportementales, cliniques, et plus récemment de neuroimagerie fonctionnelle, accumulées dans ce cadre a donné lieu à de nombreuses modélisations des processus impliqués.

On peut distinguer deux approches majeures : l'approche neuropsychologique qui se base sur l'étude des dyslexies acquises, c'est à dire des troubles spécifiques de la lecture consécutifs à des atteintes cérébrales, pour inférer le fonctionnement normal, et l'approche computationnelle/connexionniste issue de la psychologie cognitive qui vise à simuler sous la forme de programmes informatiques les aspects quantitatifs du comportement humain (temps de réaction par exemple) dans différentes tâches. La majorité des auteurs s'accorde cependant pour penser que les mots connus sont représentés en mémoire sous la forme d'un « lexique mental », lexique qui est au centre de la plupart des modèles, qu'ils soient neuropsychologiques ou computationnels et dont l'organisation fonctionnelle est source de débats.

Les modèles issus de l'approche neuropsychologique sont typiquement modulaires, c'est à dire formés de sous-systèmes cognitifs relativement indépendants et organisés hiérarchiquement. Classiquement, ils postulent le passage par deux stratégies distinctes pour prononcer un mot écrit (« dual route ») : la procédure lexicale par laquelle nous accèderions au lexique mental et donc aux représentations des mots connus, et la procédure sous-lexicale ou phonologique qui permettrait, dans le cas de mots inconnus, de transcrire la séquence de lettres en sons. L'hypothèse de cette subdivision reposait d'une part sur l'existence de cas de

dyslexie de surface dans lesquels les patients ont des troubles plus marqués pour les mots irréguliers, signe d'une perte de l'accès au lexique mental et de l'utilisation prépondérante d'une stratégie de conversion grapho-phonémique, et d'autre part sur les cas de dyslexie phonologique, dissociation inverse dans laquelle les patients deviennent incapables de lire des mots inconnus ou des non-mots, puisqu'ils ne se basent plus que sur la voie lexicale (Ellis, 1993; Patterson, 1981). La figure 5A est une représentation graphique de l'un de ces modèles, proposé par Ellis (Ellis & Young, 1988; Ellis, 1993).

Les modèles computationnels ne font pas de distinction entre des traitements lexicaux et sous-lexicaux. Ils attribuent les différences de temps de traitement des mots connus et inconnus davantage à des différences quantitatives d'interactions entre niveaux de traitement, ou d'excitations/inhibitions d'unités d'un niveau donné qu'à des voies de traitement qualitativement distinctes. Il en existe de nombreuses versions, chacune créée pour expliquer le maximum d'effets comportementaux (par exemple l'effet de fréquence des mots, c'est à dire le fait que les mots les plus fréquents de la langue sont lus plus rapidement que les mots peu fréquents) dans un tâche donnée (par exemple une tâche de prononciation, Grainger & Dijkstra, 1996, voir Jacobs & Grainger, 1994, pour une revue détaillée). Le modèle ayant sans doute eu le plus d'influence dans ce champ est le modèle d'activation interactive (McClelland & Rumelhart, 1981), décrit en figure 5B. Ce modèle est constitué de plusieurs niveaux (ou couches) qui interagissent, c'est à dire que le niveau supérieur (celui des mots) va activer en retour le niveau inférieur. Chaque niveau est lui même formé d'unités traitées en parallèle, et lorsqu'une unité est activée, elle va inhiber les autres unités du même niveau. Ce modèle, qui s'applique essentiellement aux représentations orthographiques, et est volontairement très simple et bien sûr incomplet, a largement servi de base au développement de modèles plus détaillés (Adams, 1990, ch.6 ; Coltheart et al., 2001; Grainger & Dijkstra, 1996; Jacobs & Grainger, 1994).

La tendance actuelle est à l'intégration de ces deux approches dans des modèles mixtes permettant de tenir compte à la fois des données des patients cérébrolésés et de celles obtenues par les méthodes de chronométrie mentale. Le « dual route cascaded model » (Coltheart et al., 2001) est un modèle computationnel très récent qui d'un côté reprend l'hypothèse neuropsychologique de différentes voies de traitement, et de l'autre se base sur la vision de Rumelhart et McClelland (1981), chaque voie étant constituée d'un certain nombre de couches qui interagissent par des relations d'excitation et d'inhibition, et chaque couche

étant elle même composée d'unités individualisées (voir figure 5C). Le terme « cascaded » s'oppose au terme « thresholded », c'est à dire que les auteurs font l'hypothèse que pour passer d'une couche à une autre, l'activation n'a pas besoin d'atteindre un seuil donné. La plus petite activation à l'intérieur d'une couche s'étend automatiquement aux couches supérieures, ce qui implique que le lecteur n'utiliserait jamais exclusivement l'une ou l'autre des voies de traitement, mais toujours en partie l'une et l'autre simultanément. Ceci pourrait en outre expliquer certaines données de la neuroimagerie fonctionnelle, qui montrent que le traitement de pseudomots implique globalement les mêmes régions cérébrales que celui des mots (voir Mechelli et al., 2003 pour une revue récente).

Ce survol rapide des recherches sur la reconnaissance de mots avait pour but de créer un cadre de référence, afin de préciser à quel niveau portent nos hypothèses de travail. Il nous permet de pointer du doigt l'importance de la reconnaissance des lettres dans la lecture. En effet, tout comme il existe dans la littérature un consensus sur l'existence du « lexique mental », les différents auteurs s'accordent généralement pour désigner la lettre comme l'unité de base du traitement (Adams, 1990, ch. 5 et 6 ; Massaro & Klitzke, 1977; Petit, 2002). C'est évident dans le modèle de McClelland et Rumelhart (figure 5B), où les différentes lettres du mot seraient analysées en parallèle pour permettre la reconnaissance extrêmement rapide du mot présenté. C'est aussi le cas dans le modèle d'Ellis (figure 5A) où le système d'analyse visuelle aurait pour rôle de déterminer l'identité et l'ordre des lettres formant le mot. Le « dual route cascaded model », quant à lui, contient aussi une couche « lettres », largement inspirée du modèle de McClelland et Rumelhart (figure 5C). Ainsi, les étapes précoces du traitement des mots, c'est à dire les étapes perceptives, impliqueraient l'unité lettre. Si des interactions perceptivo-motrices interviennent dans la perception de l'écrit, nous estimons donc que ces interactions auront lieu au niveau du traitement des lettres individuelles, et non à un niveau plus élevé.

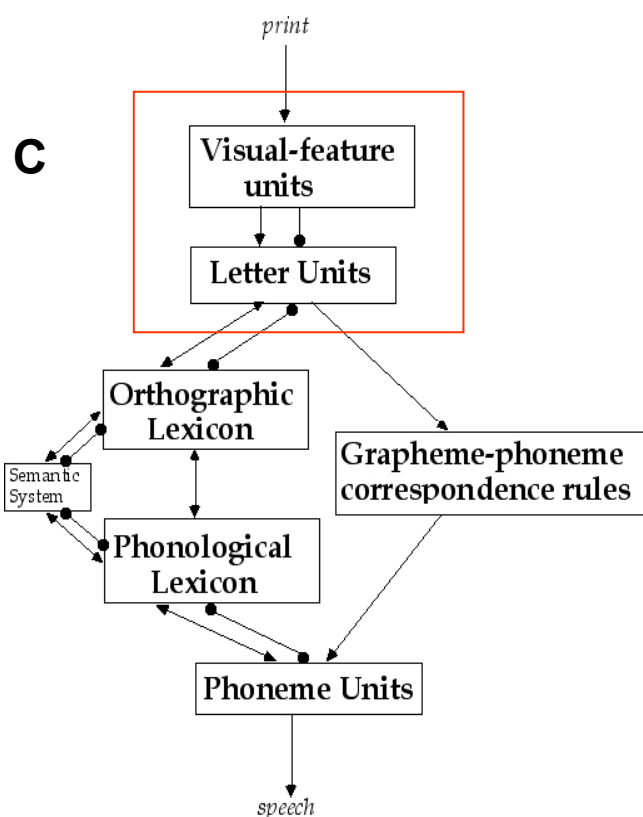
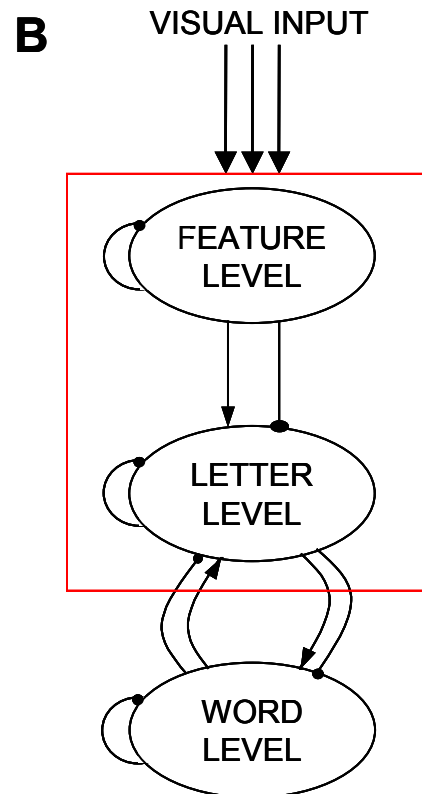
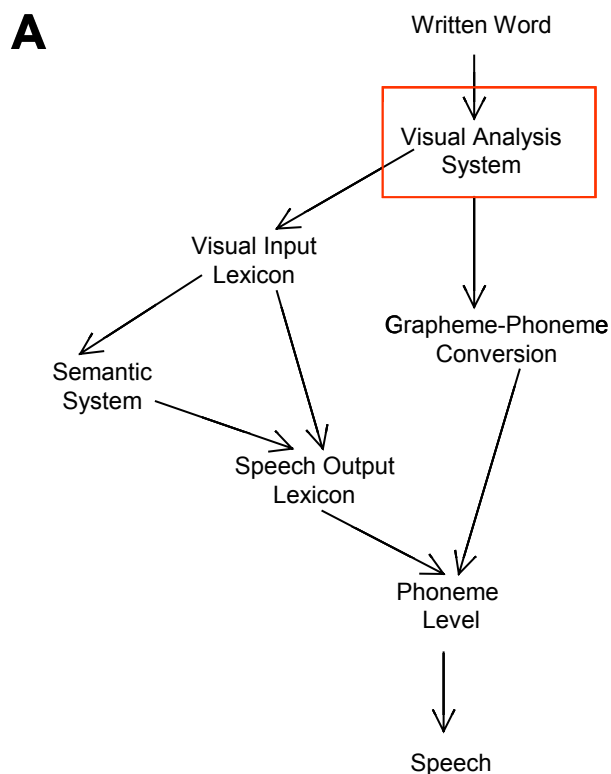


Figure 5. Trois modèles de la lecture

A. Modèle neuropsychologique à deux voies (phonologique à droite et lexicale à gauche), d'après Ellis (1993) et Ellis et Young (1988)

B. Modèle d'activation interactive de McClelland et Rumelhart (1981). Chaque niveau est lié au suivant par des connexions excitatrices et inhibitrices. Le niveau des mots agit en retour sur le niveau des lettres.

C. Modèle DRC (dual route cascaded) de Coltheart et al. (2001). Modèle à deux voies formé de couches qui interagissent par des relations d'excitation/inhibition.

La reconnaissance visuelle des lettres composant le mot est le premier processus mis en jeu dans la lecture (cadre rouge)

→ excitation —● inhibition

Existe-t-il des arguments concrets pour affirmer que les lettres sont les unités de base du traitement des mots ? L'un des plus convaincants est décrit par Adams (1979), qui a présenté à ses sujets des mots courts fréquents, ainsi que des pseudomots réguliers ou non. Les sujets reconnaissaient systématiquement plus rapidement les mots que les pseudomots réguliers, et les pseudomots réguliers plus rapidement que les pseudomots irréguliers, suivant un effet bien connu. Plus intéressant, elle a démontré que cet avantage des mots n'était pas affecté par le fait de distordre la typographie des **StimULi**, ce qui prouve que les sujets ne se basaient pas sur la forme globale du mot (car dans ce cas leurs performances pour les mots en typographies distordues auraient dû chuter pour atteindre le niveau des pseudomots) mais effectivement sur l'analyse des lettres constitutantes (voir aussi Mayall et al., 1997). Une étude récente en Tomographie par Emission de Positons (TEP) montre que le fait de perturber la forme globale du mot en mélangeant mAjUsCuLes et MiNuScUIEs ne change pas les stratégies de lecture : en effet la seule aire dont l'activation est modulée par ce type de stimuli est le lobe pariétal droit, connu pour son importance dans les phénomènes attentionnels (Mayall et al., 2001). Il n'y a pas d'effet dans les aires traditionnellement impliquées dans la lecture. Une seconde preuve de l'importance de la reconnaissance des lettres individuelles en lecture est apportée par les cas d'alexie pure ou « lecture lettre par lettre », qui se manifestent par une lecture très lente et laborieuse et des difficultés d'autant plus importantes que le mot est long, en dehors de toute autre atteinte du langage. Voilà ce que l'un de ces patients (Perri et al., 1996) écrit dans son journal : « Je m'excuse auprès du lecteur, mon cerveau n'est pas encore guéri. J'arrive à peine à écrire, et ensuite je ne peux plus lire ce que je viens d'écrire, je ne connais plus les lettres, ni les miennes, ni celles qui sont imprimées sur les journaux ou les livres. » (notre traduction). Il se trouve effectivement, comme nous en discuterons plus bas, que ce trouble général de la lecture a été attribué à un déficit d'identification des lettres qui empêcherait qu'elles soient traitées en parallèle pour reconnaître efficacement le mot (Arguin & Bub, 1993; Bartolomeo et al., 2002 ; Behrmann et al., 1998 pour une revue sur 57 patients ; Miozzo & Caramazza, 1998; Mycroft et al., 2002; Perri et al., 1996). Des difficultés à activer efficacement les représentations individuelles des lettres peuvent donc prévenir une lecture normale. Notons enfin, dernier argument, que la capacité d'un enfant pré-lecteur à identifier correctement les caractères alphabétiques est connue comme un bon prédicteur de sa réussite subséquente en lecture, comme le souligne Adams (Adams, 1990, p.61-64; voir aussi Fitzgerald & Shanahan, 2000; Näslund & Schneider, 1996).

2. Données comportementales, hypothèses fonctionnelles

Si l'identification des lettres est considérée comme critique pour la reconnaissance des mots qu'elles forment, très peu d'études ont été consacrées aux processus particuliers mis en œuvre dans ce phénomène. L'expérience sans doute la plus influente dans le domaine est celle de Posner et collaborateurs. Elle consistait en une tâche d'appariement de lettres : les sujets devaient répondre si oui ou non deux lettres présentées simultanément (Posner & Mitchell, 1967) ou séquentiellement (Posner & Keele, 1967) avaient le même nom. L'identité pouvait être soit physique (paires de type A/A) soit nominale (A/a). Les résultats montraient que les réponses aux paires « A/A » étaient largement facilitées par rapport aux réponses aux paires « A/a » ou aux paires différentes (A/B ou A/b). Selon les auteurs, cela montrait que le traitement des lettres reposait sur l'activation de deux codes distincts, le code visuel et le code nominal. D'autres études se sont intéressées à cette question, en tentant de préciser les conditions de mise en jeu de ces deux niveaux, afin de caractériser le fonctionnement interne de chacun. Un outil pertinent dans ce cadre est le paradigme d'amorçage masqué, dans lequel une lettre « amorce » est présentée très brièvement avant la lettre à reconnaître. En faisant varier la relation entre l'amorce et la cible dans différentes tâches, il est possible de déterminer très précisément quels sont les facteurs qui vont influencer le traitement d'une lettre (Arguin & Bub, 1995; Bowers et al., 1998; Jacobs & Grainger, 1991; Petit, 2002).

On peut distinguer trois catégories de tâches pour étudier les différents niveaux de traitement des lettres isolées : - la tâche d'appariement qui a été utilisée par Posner et ses collaborateurs (voir plus haut) et qui consiste à répondre si deux lettres présentées ont ou non la même identité, - la tâche de « décision alphabétique », qui consiste à répondre si le stimulus présenté est une lettre ou un symbole autre, et enfin - la tâche de dénomination qui consiste à prononcer le nom de la lettre présentée. Les résultats montrent que les effets d'amorçage diffèrent notablement si la lettre doit être identifiée explicitement, comme dans une tâche de dénomination, ou simplement catégorisée dans une tâche de décision alphabétique (Arguin & Bub, 1995; Bowers et al., 1998). Ils confirment globalement l'existence de deux niveaux de représentation, un niveau où la configuration visuelle est analysée (élaboration d'une description structurale : « le code visuel » de Posner et ses collaborateurs), et un niveau supérieur mis en jeu plus tardivement, où sont représentées les identités abstraites des lettres, c'est à dire indépendantes de leur forme (le « code nominal »). Par exemple, dans une tâche

de décision alphabétique, les réponses pour les lettres sont facilitées lorsque l'amorce est une lettre, indépendamment de son identité, par rapport à la situation où l'amorce est une non-lettre. Cet effet global est interprété comme une « préactivation » d'un ensemble de représentations spécifiques aux lettres dans le contexte de cette tâche particulière (Arguin & Bub, 1995). Cependant, l'effet d'amorçage est beaucoup plus fort lorsque l'amorce est exactement la même lettre (A/A) que lorsqu'elle n'est que nominalement identique (a/A), ce qui montre que les processus de catégorisation du stimulus reposent essentiellement sur l'activation des représentations visuelles (Arguin & Bub, 1995; Jacobs & Grainger, 1991). Dans le cadre de la tâche de dénomination, par contre, l'effet de facilitation est le même pour les amorces nominalement et physiquement identiques, ce qui implique que le sujet passe cette fois par des représentations indépendantes de la forme pour identifier précisément une lettre donnée (Arguin & Bub, 1995; Petit, 2002). Les amorces physiquement ressemblantes mais nominalement différentes (B/R) ont un effet inhibiteur sur les latences de réponses, indiquant que la reconnaissance explicite est dépendante du niveau de bruit général dans les représentations (Arguin & Bub, 1995).

Notons qu'Arguin et Bub ne trouvent pas d'effet d'amorçage lorsqu'ils manipulent la similarité phonologique entre l'amorce et la cible (S/F), et qu'ils concluent qu'à des niveaux de traitement précoces, la phonologie n'intervient pas dans l'identification d'une lettre. Cette conclusion a été discutée par d'autres auteurs (Bowers et al., 1998). Dans des expériences utilisant les potentiels évoqués, Petit (2002) a pu séparer les corrélats électrophysiologiques liés à ces deux niveaux de traitements : l'effet des amorces sur le traitement visuel est précoce (90 ms après l'apparition de la cible) tandis que l'effet sur les représentations abstraites apparaîtrait plus tardivement (à partir de 240 ms). À partir de cette étape « d'abstraction », le système de lecture ne tiendrait plus compte des propriétés visuelles du stimulus. On peut citer à ce sujet le commentaire d'Adams (1979), à propos de l'étude décrite plus haut. Elle rapporte que, à des durées de présentation brèves, les sujets lisaient les mots sans avoir conscience de l'inhomogénéité des *poliCeS*, comme si l'accès aux représentations lexicales devenait indépendant de la forme visuelle du stimulus.

3. Troubles de reconnaissance des lettres dans l'alexie pure

Les travaux sur les patients atteints d'alexie pure sont aussi très informatifs quant à l'organisation des représentations des lettres, et confirment l'existence de plusieurs niveaux de traitement. Nous avons mentionné plus haut que la cause présumée des difficultés en lecture dans l'alexie pure est une altération du traitement visuel des lettres isolées, responsable en particulier de la lenteur de la lecture (Behrmann et al., 1998). Quelques études ont analysé très précisément la nature du trouble au regard de la perception de lettres isolées. L'atteinte peut être générale et toucher des niveaux très précoces de l'analyse visuelle, empêchant de traiter très rapidement et en parallèle des séquences complexes de stimuli (Behrmann et al., 1998; Perri et al., 1996). Le patient décrit par Perri et collaborateurs, par exemple, produisait de nombreuses erreurs d'identification de lettres, erreurs de nature visuelle puisqu'il confondait des lettres physiquement proches (b/p, b/d, g/q...) et non phonologiquement proches (v/s, l/r). Cependant, une tâche de rapidité perceptive a montré que l'atteinte n'était pas spécifique aux lettres mais générale, s'étendant par exemple aux chiffres ou aux figures géométriques. Dans ce cas, donc, le patient ne pouvait plus accéder à la description structurale des lettres, c'est à dire apparier le produit de l'analyse perceptive à la représentation mentale correspondante. Miozzo et Caramazza (1998) rapportent un cas un peu différent, dans lequel la patiente était toujours capable de déterminer si une forme graphique était une lettre ou une non-lettre ainsi que de reconnaître si une lettre était orientée correctement, mais avait perdu la faculté de reconnaître la minuscule correspondant à une majuscule donnée et bien sûr de dénommer les lettres. Selon les auteurs, l'accès aux représentations structurales était préservé et permettait donc de reconnaître les lettres comme des objets visuels spécifiques avec des orientations canoniques particulières, mais la détermination de l'identité abstraite de la lettre était abolie. Arguin et Bub (1993) arrivent à la même conclusion après une analyse poussée des performances de leur patient. Enfin, il arrive que le déficit se focalise sur la connexion entre des représentations abstraites préservées et la sortie articulatoire (Mycroft et al., 2002), le nom des lettres pouvant être retrouvé par d'autres modalités (motrice en particulier, nous y reviendrons). Dans ce cas, la discrimination de l'orientation, l'appariement majuscule-minuscule, la recherche d'une lettre cible dans une séquence ... sont réalisés sans problème, et seules les tâches de dénomination sont touchées.

L'analyse visuelle d'une lettre aboutissant à son identification explicite repose donc sur une série d'étapes distinctes. L'intervention des représentations phonologiques dans ces processus ne paraît pas prépondérante : il semble que le codage phonologique est surtout utilisé lorsque

la lettre doit être dénommée, mais participe peu dans d'autres contextes (Bowers et al., 1998), voir aussi (Niederbuhl & Springer, 1979). D'autre part, la réalisation de tâches de nature visuo-spatiale, comme discriminer l'orientation d'une lettre ou l'apparier avec la même lettre écrite dans une autre police n'est pas perturbée par l'abolition de l'accès aux représentations phonologiques (Mycroft et al., 2002). En fait, les étapes les plus précoces de l'analyse, qui se basent sur les représentations visuelles semblent essentiellement de nature visuo-spatiale, non verbale (Hellige & Webster, 1979).

4. Bases neurales

Les lésions causant l'alexie pure sont quasi-systématiquement localisées dans le cortex occipital gauche, s'étendent à la matière blanche de la partie postérieure du corps calleux (splénium) et impliquent souvent une partie du lobe temporal (voir Damasio & Damasio, 1983; Montant & Behrmann, 2000 pour une revue complète). Les propriétés fonctionnelles de ces régions ont beaucoup été étudiées avec les techniques d'imagerie cérébrale ; la question sous-jacente étant de déterminer si oui ou non certaines parties du cortex sont spécialisées dans le traitement visuel de lettres et de mots. L'implication prédominante de régions occipito-temporales gauches dans la perception de lettres, ou de chaînes de lettres, par rapport à des chiffres ou des formes géométriques a effectivement été démontrée à plusieurs reprises (Cohen et al., 2000; Kuriki et al., 1996; Polk & Farah, 1998; Polk et al., 2003; Tarkiainen et al., 1999). Ces données ont relancé le débat sur « l'aire de la forme visuelle des mots », siège du « Wortschatz » de Wernicke. Tarkiainen et coll. (1999) ont par exemple caractérisé par MEG le déroulement temporel des activations précoces générées par la perception de chaînes de lettres ou de symboles de différentes longueurs et bruitées visuellement à différents degrés. Ils ont mis en évidence plusieurs sources d'activation. La première, émergeant vers 100 ms après la présentation du stimulus, distribuée dans les aires visuelles ventrales et modulée par le bruit visuel, reflétait l'analyse visuelle précoce. La seconde, vers 150 ms provenant de la région occipito-temporale inférieure gauche, montrait une préférence pour les chaînes de lettres. La troisième possédait des propriétés similaires à la seconde, mais était localisée à droite et n'était pas spécifique aux lettres. Polk et Farah (1998) expliquent la spécialisation d'une partie du cortex occipito-temporal dans le traitement de lettres par une hypothèse de co-occurrence : des représentations neurales localisées dans une région du cortex vont se développer pour des catégories de stimuli qui apparaissent fréquemment et simultanément,

selon des règles hebbiennes. C'est le cas des lettres dans le contexte des mots ou des textes. Nous reviendrons en discussion sur ces notions de représentations neurales localisées ou distribuées, et sur les hypothèses relatives à leur mise en place. Enfin, mentionnons que certains auteurs font l'hypothèse d'un dysfonctionnement de l'aire visuelle des mots chez les sujets dyslexiques (Brunswick et al., 1999; Helenius et al., 1999).

Notons deux points pour terminer : d'abord, les études en neuroimagerie (peu nombreuses) qui se sont focalisées sur la perception de lettres ou du moins sur les étapes précoces de la lecture ont volontairement restreint leur champ d'investigation aux cortex occipital et temporal. Par exemple, Polk et coll. (2002) rapportent deux expériences : dans la première, ils n'ont acquis que des images du bas du cerveau, et dans la seconde, ils ont acquis le cerveau entier mais ont restreint leurs analyses statistiques à des régions d'intérêt définies dans le cortex occipito-temporal. Ce « biais » repose évidemment sur les connaissances antérieures en termes de lésions dans l'alexie pure. Il en résulte malheureusement que les activations provenant d'autres régions sont négligées ou peu discutées. Le second point est que l'existence même de l'aire visuelle des mots a récemment été décriée (Price & Delvin, 2003) : des activations à des localisations exactement identiques ont été rapportées dans le cadre de tâches portant sur des images d'objets (par exemple des animaux : Martin et al., 2000). Price et Delvin (2003) soulignent que la représentation neurale de la forme visuelle des lettres et des mots ne peut être appréhendée de façon réaliste que par la description d'un réseau intégré, et non par la mise en évidence d'une seule aire.

II.B. Données sur les aspects moteurs de l'écriture

De Ajuriaguerra (1979) résume parfaitement la singularité de l'écriture en soulignant qu'elle est « à la fois praxie et langage ». C'est effectivement un acte très particulier car signifiant, c'est à dire visant à la communication et à la transmission d'informations entre individus, et reposant sur un système symbolique arbitraire, au même titre que les mouvements articulatoires constituant la parole ou les gestes manuels d'expression. Dans le langage courant, le terme « écriture » fait référence à de nombreux niveaux de traitement : l'agencement des idées dans un texte, la prise de notes, le fait que nous sachions comment s'écrit tel ou tel mot que nous entendons, et bien sûr le mouvement permettant la formation précise et rapide d'un tracé. C'est en fait seulement ce dernier niveau que nous désignerons

quand nous parlerons d'écriture. Nous allons nous intéresser spécifiquement à l'ensemble des mécanismes moteurs qui sous-tendent la production du geste d'écriture. En résumant les connaissances existantes, nous pourrions ainsi mieux cerner quels aspects de ce geste si particulier sont susceptibles d'être impliqués dans d'éventuelles interactions perceptivo-motrices. Les données disponibles à ce sujet proviennent :

- de la psychologie expérimentale, qui dispose depuis le début des années 80 des tablettes graphiques, qui permettent d'enregistrer précisément (à 0,2 mm près) les coordonnées de la pointe du stylet sur le plan de travail avec une très bonne fréquence d'échantillonnage (jusqu'à 200 points par seconde) : ces outils très précis sont utilisés pour analyser les paramètres spatio-temporels de l'exécution.
- de la neuropsychologie, par l'étude de patients ayant perdu la capacité d'écrire suite à une lésion cérébrale (agraphie), soit sélectivement, soit dans le contexte de troubles associés.
- de l'imagerie cérébrale, bien que peu d'études sur la graphomotricité aient été réalisées à l'heure actuelle, les techniques d'imagerie étant très sensibles aux mouvements du sujet et encore relativement peu propices à l'enregistrement simultané des paramètres cinématiques de l'action.

Les modèles qui découlent de l'ensemble de ces observations sont comparables, bien qu'ils reposent sur des approches relativement différentes (Ellis, 1988; Roeltgen, 1985; van Galen, 1991). Ils ne sont pas extrêmement récents, mais à notre connaissance, la réflexion au sujet du mouvement d'écriture n'a pas beaucoup changé depuis 10 ans. Nous synthétiserons ces modèles après avoir résumé les points importants de la littérature.

1. Les paramètres invariants du mouvement : indices sur la nature des programmes moteurs

Du point de vue moteur, l'écriture comporte à la fois des composantes *topocinétiques*, qui permettent la gestion des contraintes spatiales dues au déplacement de la main dans l'espace de la feuille, et des composantes *morphocinétiques*, qui sous-tendent la production de la forme des lettres. Alors que les premières sont basées sur un mode de contrôle rétroactif (feedback kinesthésique et visuel), les secondes s'appuient sur un mode de contrôle proactif (Paillard, 1990). L'absence de vision ne change par exemple pas la forme globale des lettres

ni la durée de production, mais perturbe sélectivement l'agencement du tracé sur l'horizontale, ainsi que la position des traits des 't' et des points des 'i' (Smyth & Silvers, 1987). Elle conduit aussi à plus d'erreurs (par exemple omission de traits ou de lettres), mais qui sont de même nature que lorsque l'on ajoute une tâche interférente, suggérant dans ce cas un effet attentionnel. Teasdale et coll. (1993) ont comparé l'écriture d'une patiente déafférentée qui écrivait avec ou sans la vision de sa main avec l'écriture de sujets normaux. Chez la patiente, la localisation des différentes parties du tracé en l'absence de retour visuel était beaucoup plus perturbée que chez les contrôles, mais la forme globale était largement préservée. Les auteurs concluent que les retours kinesthésiques sont importants pour le respect des contraintes de l'espace graphique, ainsi que pour la calibration de la direction du mouvement, mais pas pour la programmation ou le contrôle des composantes morphocinétiques de l'écriture. C'est essentiellement l'aspect morphocinétique qui nous importera, puisque c'est cette composante du geste qui est directement reliée à la forme des lettres (bien que la nature exacte de cette relation reste à préciser). Elle implique l'existence d'une représentation motrice des mouvements graphiques. Il est important de définir assez précisément cette représentation dans la mesure où l'on va chercher à déterminer si elle interagit avec la représentation visuelle des lettres décrite plus haut. L'essentiel des travaux dans le domaine de la graphomotricité a en fait eu pour but de déterminer la nature de l'information codée dans ces représentations. Pour cela, les études ont porté sur l'analyse des invariants du mouvement. Le raisonnement étant que les paramètres du mouvement qui seront les moins perturbés par des variations du contexte d'exécution sont probablement ceux qui sont stockés au niveau le plus haut, dans la structure du programme moteur. En revanche, les paramètres les plus variables peuvent être considérés comme la manifestation de contraintes plus périphériques, liées à l'exécution.

a. Invariances cinématiques

Le premier invariant de l'écriture à avoir été mentionné est le principe d'isochronie, c'est à dire la constance de la durée d'exécution en dépit de changements de taille. Plus simplement, si nous devons écrire plus gros, nous écrivons plus vite (Viviani & Terzuolo, 1980; Viviani & Terzuolo, 1983). Il a cependant été démontré qu'il s'agissait davantage d'une tendance « à ne pas accroître le temps d'exécution dans les mêmes proportions que la longueur de tracé » (Zesiger, 1995), que d'un principe absolu. Des augmentations de taille s'accompagnent en fait d'augmentations de la durée, quoique moins importantes en proportion (Wright, 1993;

Zesiger, 1995). Ces variations persistent si le sujet utilise un effecteur différent (main dominante vs. Bras, Wright, 1993). D'autre part, Wright (1993) a montré que les sujets étaient parfaitement capables de modifier la vitesse d'exécution en maintenant la taille constante. Outre ce principe global d'isochronie, Viviani et Terzuolo (1980 ; 1983) ont aussi démontré que les rapports temporels des différents traits formant la lettre ou le mot (timing relatif) restaient constants, et proportionnels à la durée totale de production (*homothétie temporelle*). Selon les auteurs, cette tendance s'explique par la nécessité de préserver la continuité et l'unité de l'action. Elle serait compatible avec l'hypothèse d'un programme central spécifié sous la forme d'une séquence temporelle d'activation de muscles agonistes et antagonistes (Wing, 1978). Encore une fois néanmoins, la notion d'homothétie temporelle a par la suite largement été critiquée : il semble que la mise en évidence de cet invariant dépende totalement de la méthode utilisée pour traiter les productions (Gentner, 1987; Wright, 1993; Zesiger, 1995). Les résultats n'étant pas robustes pour toutes les méthodes statistiques employées, on peut douter de la généralité du principe d'homothétie temporelle. Heuer et Schmitz (1988) ont testé la transférabilité d'un programme moteur (mouvement du coude) selon que le timing relatif était conservé ou pas. Leur hypothèse était que si le programme moteur est effectivement codé en termes temporels, le transfert d'un mouvement appris à un nouveau mouvement dont le timing relatif est différent devrait être plus difficile que si ce dernier est conservé. Heuer et Schmitz n'ont trouvé aucune différence dans les deux cas, le transfert étant toujours rapide et aisé. Ces résultats ne confirment donc pas la conception du programme moteur codé temporellement. Les auteurs expliquent l'homothétie temporelle comme un phénomène stratégique, c'est à dire que le timing relatif proviendrait d'une gamme de préférences temporelles générales, et serait dépendant des caractéristiques spatiales du mouvement.

La dernière caractéristique cinématique du mouvement d'écriture à mentionner est la loi liant vitesse tangentielle d'exécution et rayon de courbure de la trajectoire (*loi de puissance 2/3*), que nous avons déjà mentionnée plus haut (De'Sperati & Viviani, 1997; Lacquaniti et al., 1983; Viviani & Terzuolo, 1982). Cette tendance se manifesterait dès l'âge de 5 ans dans les mouvements de dessin d'ellipses (Viviani & Schneider, 1991). Cette loi générale, non spécifique aux mouvements d'écriture, a été rediscutée plus récemment dans le cadre théorique du modèle du « minimum de secousses » (Richardson & Flash, 2002; Viviani & Flash, 1995). Ce modèle postule qu'il n'existe pas d'engramme moteur totalement prédéterminé en termes de trajectoire, mais un principe de contrôle optimal qui contraint le mouvement de manière à ce qu'en joignant deux points, il reste le plus lisse possible du point

de vue cinématique, et que la trajectoire dévie le moins possible d'une ligne droite. En comparant les performances de sujets humains avec celles prédites par le modèle mathématique, les auteurs ont trouvé une très bonne concordance. En outre, de manière particulièrement intéressante, il a été démontré dans une étude électrophysiologique avec des singes qui avaient appris à dessiner des spirales, que la loi de puissance $2/3$ trouve probablement sa source dans l'activité des neurones du cortex moteur primaire. Dans cette tâche, la direction des vecteurs de populations de neurones du cortex moteur primaire varie en suivant une cinématique qui reflète quasi-exactement la loi de puissance $2/3$ (Schwartz, 1994). La loi de puissance $2/3$ serait l'expression d'un mécanisme mis en jeu par le système nerveux central pour diminuer le nombre de degrés de liberté disponibles au cours de l'exécution du mouvement.

b. Invariance spatiale

L'aspect le plus fascinant du mouvement d'écriture, et le plus fréquemment mentionné, est la constance de la forme produite malgré des changements d'effecteur (main droite, main gauche, pied, coude...), de support ou d'instrument utilisé (Castiello & Stelmach, 1993; Merton, 1972; Thomassen & Teulings, 1983; Viviani & Terzuolo, 1983). Cette invariance spatiale peut être qualifiée « d'équivalence motrice » (Bernstein, 1967) si l'on se réfère aux changements d'effecteurs, et « d'homothétie spatiale » dans le cas des changements de taille d'écriture. Elle montre que les programmes moteurs sont codés à un niveau *abstrait*, c'est à dire qu'ils sont spécifiés indépendamment des groupes musculaires impliqués. Pourtant, comme le souligne Zesiger (1995, p 98), peu d'auteurs ont tenté de quantifier réellement cette invariance spatiale. Pick et Teulings (1983) ont par exemple montré que leurs sujets avaient des difficultés à modifier intentionnellement la taille de la composante verticale des lettres sans modifier proportionnellement la composante horizontale, indiquant une dépendance forte des deux dimensions, et une tendance à préserver la forme globale. Tout comme l'homothétie temporelle, l'invariance spatiale a surtout été étudiée en considérant les rapports de longueur et d'orientation des différents traits du mot ou de la lettre, normalisés pour l'ensemble des répétitions. Une manière de segmenter la production en traits est par exemple de considérer les portions de trajectoires contenues entre les points où la vitesse tangentielle est proche de zéro (Wright, 1993). Il a de cette manière été démontré que lorsque les sujets écrivent à des tailles différentes, et/ou utilisent des effecteurs différents, la variabilité spatiale n'est pas

totalement nulle mais reste faible (van Doorn & Keuss, 1993; Wright, 1993). Elle disparaît totalement si le sujet doit s'adapter à de nouvelles conditions par un apprentissage massif, par exemple après amputation du membre dominant et pose d'une prothèse (Castiello & Stelmach, 1993). La comparaison des paramètres spatiaux, temporels ainsi que les caractéristiques de force appliquée vont dans le sens d'une plus grande invariance au niveau spatial, indiquant que les représentations motrices de haut niveau sous-tendant l'écriture seraient de nature spatiale (Teulings & Schomaker, 1993). Les impulsions de force et le timing seraient régulés à un niveau plus bas, pour adapter le mouvement au contexte biophysique et ajuster la taille de production (van Galen & Teulings, 1983; van Galen, 1991). Notons que ces tendances sont déjà présentes chez des enfants (8-12 ans) qui sont en train de construire ces représentations (Zesiger, 1995, p.199-201).

Si l'on admet (comme cela est le cas de la plupart des auteurs) que les programmes moteurs de l'écriture sont définis au plus haut niveau par des paramètres spatiaux, on peut se questionner sur la nature de l'unité de base prise en compte. Cette question a été débattue, principalement entre les partisans de l'unité « trait » et de l'unité « lettre ». Elle n'est pas totalement résolue, mais certaines données (temps de latence avant l'initiation du mouvement, selon le type d'indice disponible au préalable) indiquent que cette unité serait du niveau de la lettre (Teulings et al., 1983). Comme nous le verrons plus bas, les modèles les plus courants des processus d'écriture considèrent la lettre comme unité de base pour la programmation motrice (Rapp & Caramazza, 1997; Roeltgen, 1985; van Galen, 1991), l'unité « trait » étant individualisée seulement au cours de l'exécution (van Galen, 1991).

On le voit, les données de la littérature de la psychologie expérimentale sont parfois divergentes. Dans un article plus récent, van Galen et Weber (1998) proposent une définition un peu moins rigide de la notion de programme moteur en écriture. En effet, ils démontrent que lorsque l'on restreint brutalement l'espace disponible sur la ligne d'écriture, les sujets adaptent leur production quasi-immédiatement, en diminuant la taille. Cette réaction, bien qu'immédiate, est néanmoins progressive et continue, la progression horizontale étant modifiée plus rapidement que la progression verticale, sans que la durée globale du mouvement ne soit modifiée (donc sans coût en termes de changement du programme moteur). En outre, la manipulation de l'espace disponible conduit à de plus grandes variations de la durée relative des traits que de la forme spatiale. Selon l'auteur, ces résultats sont en faveur d'une conception plus « ouverte » des représentations abstraites de l'écriture, qui sont

toujours conçues en termes de buts spatiaux (les variations cinétiques étant dépendantes du contexte biophysique et des stratégies du sujet), mais qui ne doivent plus être vues comme une série prédéterminée et rigide de commandes musculaires. Les paramètres spatiaux pouvant être automatiquement découplés en temps réel pour répondre à des changements contextuels.

Notons pour terminer qu'il n'existe pas de différences comportementales entre gauchers et droitiers, que ce soit en termes de vitesse ou de fluence des mouvements d'écriture (Peters & McGrory, 1987; van Galen, 1991).

2. Analyse des productions dans les agraphies d'origine motrice

Dans la description des agraphies, désordres de l'écriture consécutifs à des lésions cérébrales, les auteurs distinguent classiquement les agraphies d'origine linguistique des agraphies d'origine motrice (Roeltgen, 1985). En effet, lorsqu'un mot doit être écrit, les traitements linguistiques et orthographiques vont aboutir au « niveau graphémique », mémoire tampon qui est sensée maintenir disponible la séquence de graphèmes composant le mot, et être commune aux diverses modalités de production (épellation orale, dactylographie, écriture...) (Caramazza & Miceli, 1990; van Galen, 1991; Zesiger, 1995). Ce n'est qu'à partir de ce niveau que seront mises en jeu des opérations spécifiques au mouvement graphique. Encore une fois, nous nous cantonnerons à ces opérations, parfois qualifiées de « périphériques ».

Parmi les premières observations d'agraphies d'origine motrice, on trouve celles d'Exner (1881) et de Pitres (1884), qui remarquent chez leurs patients une perte sélective de la mémoire des « efforts » musculaires combinés pour produire les lettres, en l'absence de contexte aphasique. Il arrive effectivement que les patients agraphiques deviennent totalement incapables de produire ne serait-ce qu'une seule lettre. Mais il existe aussi d'autres cas dans lesquels le geste reste bien formé (avec plus ou moins de difficultés), mais la lettre écrite n'est pas la lettre attendue. Ces patients, quel que soit le niveau de leurs troubles, restent généralement parfaitement capables d'épeler un mot, ou de le dactylographier, ce qui exclut un déficit linguistique.

Dans les cas où les lettres produites restent bien formées, il semble que ce soient des étapes en amont de la programmation motrice proprement dite qui soient touchées. Classiquement, ces patients produisent des substitutions de lettres à l'intérieur des mots, mais les lettres produites

sont lisibles (Zangwill, 1954). Les erreurs consistent généralement en des lettres physiquement semblables (par exemple P au lieu de R, Levine et al., 1988; Rapp & Caramazza, 1997, voir figure 6). Patterson et Wing (1989) ont rapporté un patient qui semblait avoir de grandes difficultés à évoquer la forme des lettres à écrire. Son déficit se caractérisait par des temps de préparation extrêmement longs, mais des temps d'exécution normaux. D'autre part, il était plus perturbé pour les lettres minuscules que pour les majuscules. Un cas comparable (Crary & Heilman, 1988) associait une grande lenteur d'écriture et des difficultés importantes dans tous les tests impliquant de l'imagerie visuelle de lettres. Hanley et Peters (1996) ont quant à eux décrit un patient dont l'écriture était perturbée sélectivement pour les caractères minuscules d'imprimerie, mais pas pour les majuscules ni pour les cursives. Selon Ellis (1988), de tels cas manifestent un déficit dans des processus qui permettent normalement de déterminer la forme générale de la lettre à écrire, jusque là représentée de manière abstraite, c'est à dire indépendamment de toute modalité sensorielle ou motrice. Cette étape de traitement, qu'il a qualifiée de « niveau allographique », aboutirait à la spécification de l'allographe approprié, c'est à dire de la « police » particulière qui, selon le contexte, va être assignée à la lettre parmi toutes ses formes possibles (majuscule/minuscule, cursif/imprimerie : a A a *ℒ*...). Afin de déterminer la nature de l'information utilisée au niveau allographique, Rapp et Caramazza (1997) ont procédé à une analyse systématique des erreurs de substitution produites par deux patients dysgraphiques. Ils concluent que les représentations mises en jeu sont indépendantes de l'effecteur utilisé, et basées sur les caractéristiques spatiales des traits constituant les lettres. En effet les patients produisaient plus fréquemment des erreurs sur des lettres qui se ressemblaient d'un point de vue moteur (par exemple K et R) que d'un point de vue visuel (F et T). L'intégrité des représentations visuelles des lettres ne semble en effet pas cruciale pour permettre des performances relativement préservées en écriture (Del Grosso Destreri et al., 2000). Cette conclusion doit être nuancée : le patient de Del Grosso Destreri et coll. était totalement alexique et incapable d'évoquer visuellement la moindre lettre. En écriture, il produisait des erreurs de substitution assez nombreuses, et focalisées principalement sur les lettres majuscules. Tout comme chez les patients de Rapp et Caramazza (1997), les lettres confondues partageaient des caractéristiques graphomotrices. Cette incapacité à sélectionner correctement un allographe à l'intérieur d'une catégorie donnée, observée en parallèle de troubles de la reconnaissance visuelle, laisserait plutôt envisager un déficit dans l'interaction entre représentations allographiques et représentations visuelles au cours de l'écriture. Plus simplement, il se pourrait que les représentations allographiques soient de nature visuo-

motrice, intermédiaire entre des représentations purement visuelles et des engrammes moteurs.

Lorsque la forme appropriée des lettres est activée, cette forme doit être implémentée au niveau moteur. C'est ce qu'Ellis (1988) appelle le niveau des « patrons moteurs graphiques », c'est à dire les séquences de mouvements mémorisées, spécifiques à un allographe donné. Lorsque ce niveau est perturbé suite à une lésion, on parle d'*agraphie apraxique* car les patients ne sont plus capables de former correctement les lettres. Nous avons pu recenser un certain nombre de cas d'agraphies apraxiques, et la variété des manifestations au niveau comportemental et au niveau des sites des lésions suggère que des processus multiples, sans doute plus complexes qu'un simple « niveau des patrons moteurs graphiques », sont à l'œuvre pour permettre l'exécution du mouvement d'écriture. Par exemple, l'agraphie se manifeste parfois dans un contexte général d'apraxie des membres (Heilman et al., 1973; Margolin, 1980; Watson & Heilman, 1983), et parfois, au contraire, totalement isolée d'autres déficits moteurs (Anderson et al., 1990; Exner, 1881; Gordinier, 1899; Hodges, 1991; Margolin & Binder, 1984; Ohno et al., 2000; Otsuki et al., 1999; Pitres, 1884; Roeltgen & Heilman, 1983). On parlera alors d'agraphie apraxique pure (ou avec praxie normale, Roeltgen & Heilman, 1983). Ce dernier type d'agraphie est particulièrement intéressant car il suggère que les mécanismes moteurs propres à l'écriture peuvent être dissociés des autres habiletés motrices au niveau fonctionnel et neural. D'autre part, certains patients restent relativement capables d'écrire si ils peuvent se baser sur un modèle (copie) (Margolin & Binder, 1984; Pitres, 1884; Roeltgen & Heilman, 1983) alors que chez d'autres patients, tout mouvement graphique est aboli, même en copie (Anderson et al., 1990; Gordinier, 1899; Hodges, 1991). Enfin, le trouble peut être assez généralisé à différents types de matériels, par exemple inclure aussi l'écriture de symboles ou les dessins de mémoire (Hodges, 1991; Margolin & Binder, 1984; Ohno et al., 2000; Pitres, 1884), ou bien être très spécifique aux lettres. On retiendra, de manière particulièrement intéressante, les dissociations très rares, entre les capacités préservées à écrire les nombres, et l'impossibilité à écrire la moindre lettre (Aimard et al., 1975; Anderson et al., 1990; Crary & Heilman, 1988). Elles montrent qu'un mouvement qui est quasi-identique mais réalisé dans deux contextes différents (linguistique vs. mathématique) n'est pas entièrement sous-tendu par les mêmes processus moteurs (voir figure 6).

Plus généralement, l'étude des agraphies d'origine motrice démontre que la capacité à écrire dépend d'interactions complexes entre plusieurs facteurs, par exemple les habiletés visuospatiales, le type de matériel..., tout cela étant sans doute sous l'influence de facteurs de plus haut niveau, linguistiques et contextuels. Néanmoins, ces pathologies suggèrent, d'une part, la relative indépendance des traitements spécifiques aux mouvements graphiques, et d'autre part, l'existence au niveau central de représentations motrices des lettres. Des cas d'agraphie motrice pure, on peut également déduire que les représentations mises en jeu sont indépendantes de l'effecteur. En effet, les troubles ne sont généralement pas spécifiques à une main donnée, même si cela n'est pas toujours vérifiable puisque l'agraphie apparaît parfois dans le contexte d'une hémiplégie. Il arrive cependant qu'une seule main soit touchée (agraphie unilatérale), généralement la main gauche chez les droitiers (Pitres, 1884; Roeltgen, 1985; Watson & Heilman, 1983, main droite chez son patient). Ces atteintes s'expliquent par des lésions calleuses, rendant impossible le transfert des engrammes moteurs stockés dans l'hémisphère gauche aux aires motrices de l'hémisphère droit (Roeltgen, 1985).

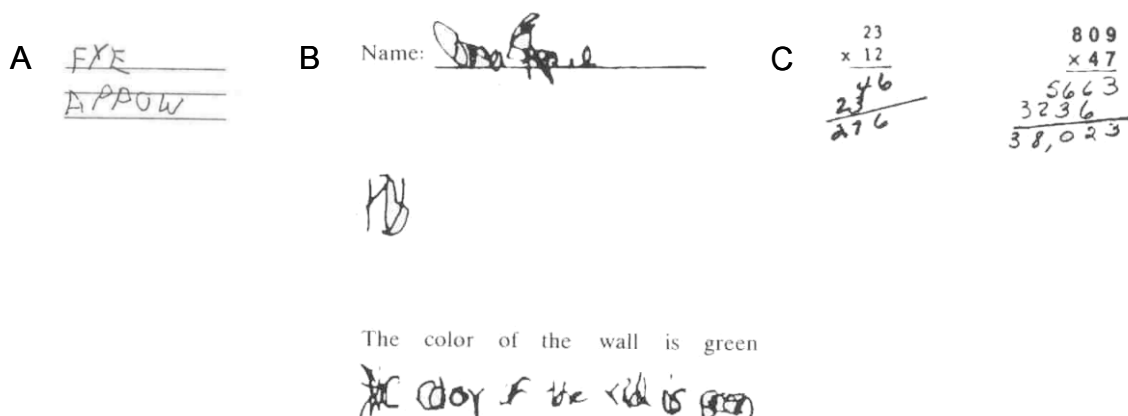


Figure 6. Echantillons d'écriture de patients agraphiques

- A. Exemple de substitutions de lettres (E → F et R → P) avec lettres bien formées dans l'écriture de « eye » et « arrow » (d'après Rapp et Caramazza, 1997).
- B. et C. Déficit massif pour l'écriture de lettres (B. écriture du prénom, des lettres 'A' et 'B', et d'une phrase courte) avec capacités intactes pour l'écriture de chiffres (C. résolution d'opérations simples). D'après Anderson et coll., 1990.

3. Bases neurales

La plupart des lésions causant des agraphies motrices se situent dans le lobe pariétal postérieur gauche ou le lobe frontal gauche chez les droitiers (Anderson et al., 1993; Roeltgen, 1985). Les interactions entre ces deux régions semblent en effet essentielles dans la génération du mouvement d'écriture. Historiquement, c'est Exner, qui en 1881 a le premier fait l'hypothèse d'un centre cérébral de l'écriture après l'observation de 5 patients agraphiques dont la lésion se situait au pied de la seconde circonvolution frontale gauche, dans le cortex prémoteur (aire d'Exner). Cette hypothèse est aujourd'hui étayée par quelques observations, où les patients présentent des lésions circonscrites de cette zone, souvent suite à l'excision d'une tumeur ou d'un kyste. De telles observations sont très rares, car les lésions de cette région sont généralement plus étendues et induisent des atteintes motrices beaucoup plus lourdes qu'une impossibilité d'écrire isolée. Outre les patients d'Exner, nous avons recensé 6 cas de patients ayant une agraphie suite à une lésion relativement focale du cortex prémoteur (Aimard et al., 1975; Anderson et al., 1990; Gordinier, 1899; Hodges, 1991; Ohno et al., 2000; Sakurai et al., 1997). Ils présentaient tous des atteintes lourdes de l'écriture, qui était réduite à des traits spatialement désorganisés. Le cas de Ohno et collaborateurs est un peu particulier, puisqu'il s'agissait en fait d'une lésion thalamique. Mais elle conduisait à une hypo-activité du cortex prémoteur gauche, démontrée par TEP.

Les lésions du cortex pariétal postérieur induisent des agraphies avec lettres lisibles, mais formées très laborieusement et des troubles d'imagerie visuelle associés (Crary & Heilman, 1988; Patterson & Wing, 1989). Elles peuvent aussi conduire à des troubles semblables à ceux observés après une lésion frontale (Otsuki et al., 1999) aussi associés à l'impossibilité à évoquer l'image visuelle de la lettre (Levine et al., 1988). Les lésions conduisant à des substitutions de lettres physiquement proches sont plus ventrales, au niveau du cortex pariéto-occipital (Del Grosso Destrieri et al., 2000; Hanley & Peters, 1996). L'ensemble de ces données suggère que les cortex prémoteur et pariétal postérieur collaborent dans les processus d'écriture, le cortex pariétal permettant de transformer les représentations visuospatiales des lettres, vues ou générées de manière interne, et le cortex prémoteur contenant une mémoire motrice des trajectoires correspondant aux différents allographes. Ce circuit est à rapprocher de celui évoqué en première partie concernant la manipulation des objets et le grasping. Il a été par ailleurs mis en évidence par des études en neuroimagerie chez des sujets sains, dans diverses tâches d'écriture (Katanoda et al., 2001; Matsuo et al., 2000; Menon & Desmond,

2001; Seitz et al., 1997). Katanoda et coll. ont extrait l'activité des aires cérébrales impliquées dans les processus liés à la programmation des mouvements d'écriture, en excluant les activations liées à l'encodage et à l'exécution proprement dite, grâce à la méthode de conjonction. Ces aires se trouvent effectivement être le cortex prémoteur gauche, le lobule pariétal supérieur, ainsi qu'une région cérébelleuse (voir figure 7). Lorsque la programmation des mouvements n'est pas dissociée de l'exécution, des aires corticales sensorimotrices s'ajoutent à ce réseau, en particulier le cortex sensorimoteur primaire et l'aire motrice supplémentaire (Menon & Desmond, 2001).

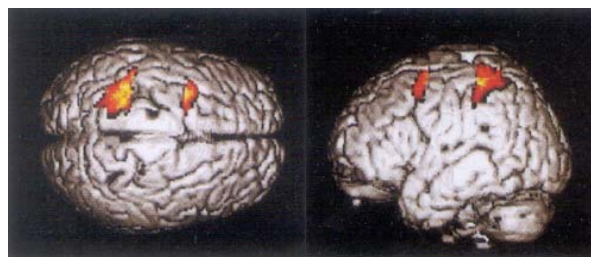


Figure 7. Vues tridimensionnelles de cerveau montrant l'activation des cortex pariétal et prémoteur gauche durant une tâche d'écriture

A gauche, vue de dessus (l'arrière est à gauche). A droite, vue de côté de l'hémisphère gauche. Voir texte pour les détails de l'expérience. D'après Katanoda et coll, 2001.

La mise en place du réseau pariéto-frontal pourrait dépendre des conditions d'apprentissage de l'écriture. Afin d'étudier les bases neurales du codage du mouvement d'écriture, Rijntjes et coll. (1999) ont réalisé une expérience en TEP dans laquelle les sujets devaient signer avec le doigt ou l'orteil. Ils ont démontré que les représentations amodales de la signature sont situées dans un réseau neural pariéto-frontal commandant les mouvements de l'effecteur qui réalise généralement le mouvement (donc la main chez la grande majorité des gens !). On peut donc se demander ce qu'il advient de la localisation de ces représentations lorsque l'écriture est naturellement produite de la main gauche... L'étude de Rijntjes et coll. suggère que dans ce cas, elles devraient être latéralisées à l'hémisphère droit. Cette question a rarement été posée, tout simplement parce que jusque très récemment, la majorité des gauchers étaient contrariés pour l'écriture. Ainsi, certains cas neuropsychologiques d'agraphie chez des gauchers suggèrent une latéralisation fonctionnelle complexe (Heilman et al., 1973; Zangwill, 1954; Zesiger et al., 1994). Notons que des cas de latéralisation atypique peuvent aussi se manifester

chez des droitiers (Roeltgen & Heilman, 1983). Pourtant, plusieurs cas sont en faveur d'une latéralisation inversée des engrammes moteurs de l'écriture chez les gauchers, du moins lorsque l'écriture n'est pas contrariée. Par exemple, le patient entièrement gaucher de Margolin (1980) a présenté une agraphie apraxique suite à une lésion centrale droite. De la même manière, Margolin et Binder (1984) rapportent le cas d'un patient gaucher pour l'écriture et ambidextre pour les autres activités, qui présentait cette fois une agraphie apraxique pure : seuls les engrammes moteurs de l'écriture avaient été détruits. La latéralisation fonctionnelle de l'écriture a été étudiée plus récemment en TEP (Siebner et al., 2002). Les auteurs ont comparé trois groupes de sujets : des droitiers, des gauchers contrariés et des gauchers non contrariés. Leurs résultats montrent que pour les sujets qui utilisent naturellement leur main dominante pour écrire, les activations sont bien latéralisées dans l'hémisphère opposé. Par contre, elles sont plus bilatérales dans le groupe des gauchers contrariés. L'ensemble de ces données indique une latéralisation prédominante des réseaux cérébraux sous-tendant l'écriture dans l'hémisphère contralatéral à la main naturellement utilisée pour écrire. Cette conclusion est aussi étayée par l'étude de Herron et coll. (1979) qui ont mesuré l'asymétrie des réponses électroencéphalographiques (EEG) chez des gauchers dans des tâches d'écriture comparées à d'autres tâches linguistiques (écouter un texte, le relater oralement ou le lire). Ils ont observé une implication constante de la région centrale droite chez tous les sujets qui écrivaient de la main gauche, quels que soient le degré de latéralité et la latéralisation des autres fonctions linguistiques.

Les différents niveaux de traitement aboutissant à l'exécution des mouvements d'écriture ont été résumés dans la figure 8. Cette figure recoupe l'ensemble des données comportementales et neurofonctionnelles que nous avons présentées.

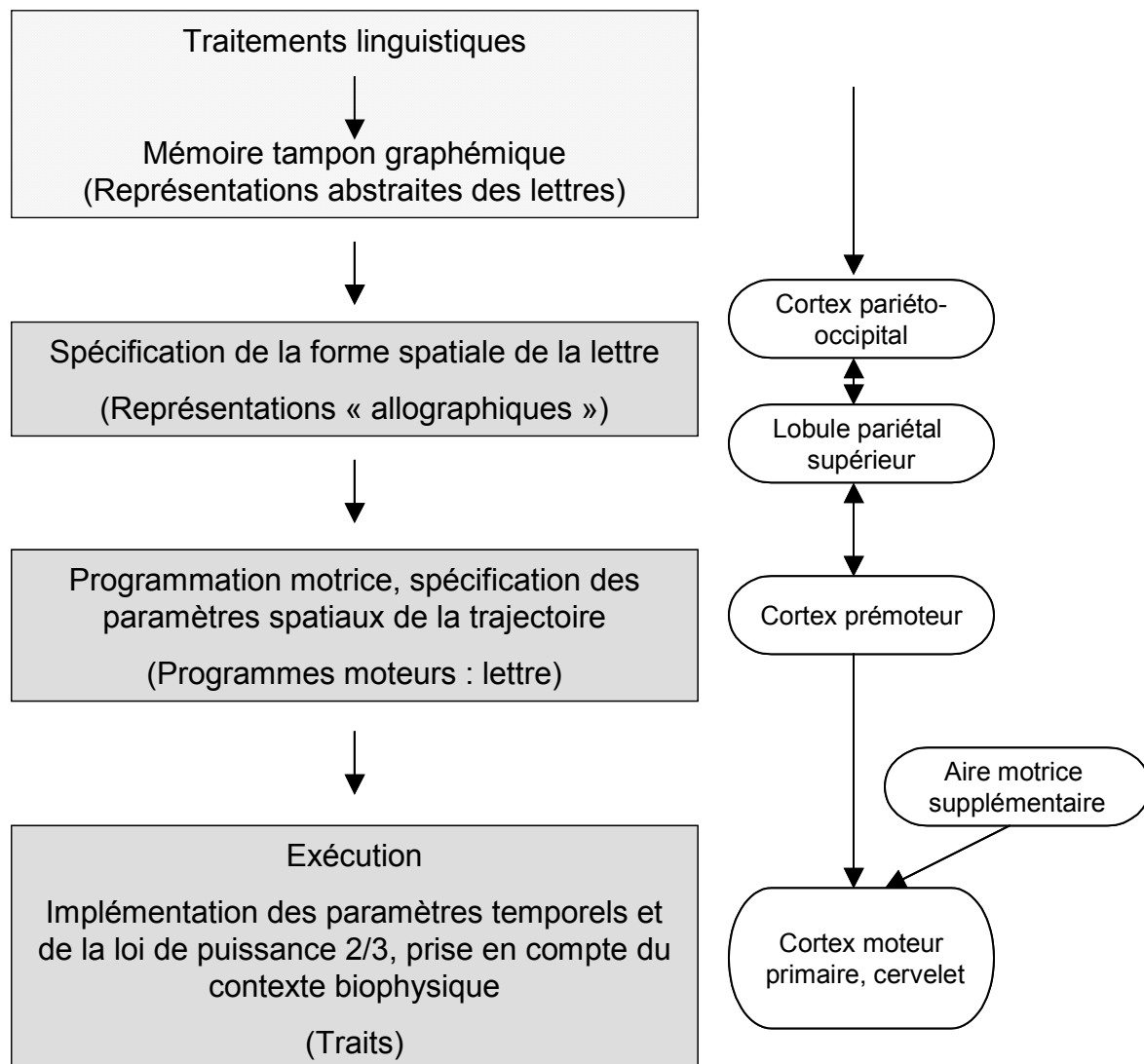


Figure 8. Niveaux de traitement postulés dans la production de mouvements d'écriture, en aval des traitements linguistiques

A gauche, les boîtes grisées figurent les différents niveaux avec, entre parenthèses, la nature de l'unité prise en compte. A droite sont représentées les structures cérébrales impliquées pour chacun des niveaux. D'après Anderson et coll (1993), Ellis (1988), Roeltgen (1985) et van Galen (1991).

4. Une autre manière d'écrire : la dactylographie

Très peu d'études se sont intéressées à cette activité motrice particulière qu'est la dactylographie, et aucune, à notre connaissance, à la production de lettres isolées dans ce cadre. Dans les études sur la production de mots, une unité possible de mesure est l'intervalle temporel entre deux frappes successives, chez des dactylographes experts, moyenné sur plusieurs répétitions. De cette manière, Viviani et ses collaborateurs (Terzuolo & Viviani, 1980; Viviani & Terzuolo, 1980; Viviani & Terzuolo, 1983; Viviani & Laissard, 1996) ont

mis en évidence l'existence d'une loi d'homothétie temporelle dans ce domaine. Les intervalles inter-frappes, pour un mot donné, auraient toujours la même durée relative par rapport à la durée totale du mouvement. Selon ces auteurs, chaque mot correspondant à une séquence caractéristique d'intervalles de temps forme une « mélodie motrice ». Les unités de base d'organisation du mouvement seraient donc des mots (Viviani & Terzuolo, 1983), alors que nous avons vu que pour l'écriture manuscrite, l'unité invariante de base est la lettre. Ces résultats ont, comme dans le cas de l'écriture manuscrite, été critiqués. Pour Gentner (1983; 1987), par exemple, les variations des durées inter-frappes reflètent les contraintes biomécaniques liées aux mains et aux doigts, et à la configuration du clavier. Le contrôle de la dactylographie pourrait être composite entre des facteurs périphériques et centraux (Gentner, 1987).

D'autres différences entre les motricités utilisées dans les deux modes d'écriture peuvent être évoquées :

- L'écriture manuscrite est par essence uni-manuelle, même si l'autre main joue un certain rôle postural (maintien de la feuille). Cette forte asymétrie manuelle implique comme nous le verrons plus bas une certaine latéralisation des structures neurales qui sous-tendent le mouvement. L'écriture au clavier est bi-manuelle : la main gauche, qui est commandée par l'hémisphère droit, participe au geste d'écriture au même titre que la droite. Par conséquent, cela suppose une communication et une coordination fine entre les deux hémisphères cérébraux.
- Sur le plan temporel il faut aussi noter des différences : chaque trait formé en écriture manuscrite prend environ 100 ms ; la formation des lettres est immédiate au clavier, et la durée moyenne entre deux frappes est de 100 ms (Zesiger, 1995, p88). L'écriture manuscrite est donc une activité plus lente que la dactylographie.
- L'écriture manuscrite se déroule sur un espace unique : la feuille de papier. Toute l'attention est focalisée sur l'extrémité du crayon, où ont lieu à la fois l'action et ses conséquences sensorielles. Au clavier, il y a deux espaces distincts : le clavier qui est l'espace moteur, et l'écran qui est l'espace visuel (Anis, 1998). Ces deux espaces sont donc séparés, ce qui impose un partage de l'attention entre eux. D'autre part, alors que l'espace moteur est très concentré dans le cas de l'écriture manuscrite, il s'étend sur tout le clavier en dactylographie. L'écriture dactylographique requiert un apprentissage visuospatial complexe, au cours duquel le débutant doit se construire une représentation cognitive du clavier (Logan, 1999).

III. Intervention de processus moteurs dans le traitement visuel de lettres

Jusqu'ici, nous avons suivi une conception « classique », en exposant séparément les données relatives à la perception visuelle de lettres et à la production écrite de ces mêmes lettres. Nous allons maintenant essayer de démontrer que parfois, la seconde habileté vient interférer avec la première.

III.A. Simulation du mouvement et perception de traces manuscrites

Nous avons évoqué plus haut le rôle des connaissances motrices dans la perception du mouvement biologique. Une série de données indique que les mêmes mécanismes seraient à l'œuvre lorsque nous reconnaissons des traces manuscrites : ces mécanismes nous permettraient d'inférer les règles de production mises en jeu par le scripteur à partir de nos propres connaissances motrices, pour discriminer correctement les caractères manuscrits malgré leur variabilité allographique. Freyd (Babcock & Freyd, 1988; Freyd, 1983; Freyd, 1987) a été parmi les premiers à s'intéresser à cette question, en montrant que nous sommes implicitement sensibles à la manière dont un caractère manuscrit a été produit. Les stimuli utilisés dans ces études étaient des caractères artificiels (pseudocaractères), chacun pouvant être écrit de deux manières différentes (voir figure 9), par exemple en traçant le dernier trait vers le haut ou vers le bas. Des échantillons de ces caractères étaient collectés, puis présentés à des sujets qui avaient pour tâche de les retenir. Dans une première étude (Freyd, 1983), les sujets apprenaient les caractères en les voyant tracés (sans toutefois les tracer eux-mêmes) sur un écran avec l'une ou l'autre méthode. Les deux séquences d'écriture conduisaient à de légères distorsions spatiales des stimuli, qui étaient différentes dans les deux cas. Après l'apprentissage, les sujets reconnaissaient plus facilement les caractères dont les distorsions étaient compatibles avec la méthode de traçage qu'ils avaient apprise. Dans une seconde étude, Babcock et Freyd (1988) ont fait l'hypothèse que ces informations dynamiques pouvaient être extraites directement sur la base de stimuli statiques. Cette fois, les sujets apprenaient des caractères manuscrits présentés visuellement sous forme statique, en les associant avec des chiffres. Au cours du test ils devaient retrouver par écrit le caractère associé à un chiffre donné. Le comportement graphique observé alors correspondait aux

règles de production présentes dans les déformations des stimuli appris, comme si en voyant simplement les caractères au cours de l'apprentissage, les sujets avaient implicitement intégré la manière dont ils avaient été tracés.

Les auteurs soulignent que ces processus pourraient se manifester différemment chez les gauchers et les droitiers, mais n'ont malheureusement pas testé directement cette hypothèse.









		Instructions			Handwritten Samples
Drawing Method	Up				
	Down				

Figure 9. Type de caractère utilisé dans les études de Freyd (1983) et Babcock et Freyd (1988)

Le dernier trait peut être tracé vers le haut ou vers le bas, ce qui entraîne des distorsions spatiales de la trace formée. Les sujets reconnaissent plus facilement les caractères tracés selon la méthode qu'ils ont eux-mêmes apprise.

Enfin, bien que les effets portent sur des caractéristiques spatiales des stimuli (ordre, direction des traits), Freyd (1987) insiste sur l'aspect dynamique des représentations sous-jacentes. Ces représentations dynamiques peuvent servir à anticiper des éléments de la séquence graphique, comme l'ont plus récemment démontré Orliaguet et coll. (1997). Cette fois les stimuli visuels étaient des paires de lettres réelles ('ll', 'le' ou 'ln'). Selon les auteurs, lorsque ces paires sont produites, la forme et la cinématique du premier 'l' varie légèrement en fonction de la lettre qui suit. Cet effet semble particulièrement robuste pour la durée du trait descendant (durée 'll' < 'le' < 'ln'). Dans l'expérience, le but était de dissocier les aspects relatifs aux distorsions spatiales et aux variations cinématiques, en utilisant des présentations visuelles statiques ou dynamiques, pour préciser à quel type d'information le système visuel est sensible lorsque nous reconnaissons des traces manuscrites. Les résultats montrent que les distorsions spatiales ne permettent pas aux sujets d'anticiper correctement l'identité de la seconde lettre, tandis que les informations cinématiques sont très efficaces et conduisent à des taux de réponses nettement différents du hasard (de 68 à 78%). Il semble donc que les fluctuations contextuelles de forme à l'intérieur des lettres soient plus difficiles à exploiter que les

distorsions spatiales qui informent sur l'ordre des traits ou la direction du mouvement, (Babcock & Freyd, 1988; Freyd, 1983). Orliaguet et coll. font l'hypothèse que les premières sont plus variables d'un sujet à l'autre et donc personnelles, tandis que les secondes sont davantage en relation avec une « grammaire de l'action » qui serait plus universelle. Ainsi, la prédiction serait plus efficace si elle se base sur des informations qui sont invariantes d'un sujet à l'autre, comme les variations temporelles qui reflètent des lois générales d'adaptation du système moteur à des variations contextuelles. Ces résultats indiquent que les sujets extraient des informations de mouvement à partir de la trace graphique manuscrite en simulant leur propre mouvement. Une autre loi générale du système moteur qui est particulièrement prégnante dans les mouvements d'écriture est la loi de puissance $2/3$ que nous avons déjà évoquée à plusieurs reprises. Kandel et coll. (2000) ont testé l'effet de la déviation par rapport à cette loi dans une tâche similaire à celle de Orliaguet et collaborateurs (1997). Cette fois cependant, les lettres 'l' n'étaient plus tracées au fur et à mesure mais étaient simplement représentées par un point lumineux en mouvement, pour isoler les informations cinématiques. Les résultats ont montré que la capacité à prédire la lettre suivant le 'l' dépendait de la ressemblance entre la cinématique du point en mouvement et un mouvement biologique réel : plus la relation entre vitesse et courbure déviait de la loi de puissance $2/3$, plus la prédiction s'approchait du hasard.

L'ensemble de ces résultats peut s'interpréter dans un cadre théorique proche de celui de la TMPP (Lieberman & Mattingly, 1985). Nous serions capables de reconnaître des traces graphiques manuscrites parce que nous sommes aussi capables de produire de telles traces. Cette interprétation est aussi en rapport avec la théorie de la simulation (Blakemore & Decety, 2001; Gallese & Goldman, 1998), le système miroir étant la base physiologique postulée sous-tendant l'appariement entre l'observation et l'exécution d'actions. Dans ce cas, effectivement, plus la trace perçue ressemblera à celle que l'observateur aurait lui-même produite, plus la reconnaissance sera efficace. C'est ce qu'ont rapporté Knoblich et coll. (2002), en montrant à leurs sujets les décours cinématiques de leurs propres productions et des productions d'un autre sujet, toujours dans une tâche d'anticipation. Lorsque l'écriture n'était pas contrainte et que le style personnel pouvait s'exprimer, les sujets répondaient correctement uniquement pour leurs propres productions. Lorsque les cinématiques des productions étaient standardisées par des contraintes spatiales, les prédictions étaient très précises dans les deux cas. Il semble donc que des mécanismes particuliers, basés sur la simulation par le sujet de son propre mouvement, permettent de reconnaître les traces manuscrites.

III.B. Interactions entre représentations motrice et visuelle des caractères

Il paraît clair que des mécanismes moteurs interviennent dans la reconnaissance et la discrimination de caractères manuscrits. Ces mécanismes sont directement à mettre en parallèle avec les interactions perceptivo-motrices impliquées dans la perception du mouvement, décrites en première partie. Ces interactions font sans doute appel à des lois générales de contrôle moteur : les sujets extraient de la trace des paramètres « universels », invariants *d'un individu à l'autre*, comme indices pour simuler leur propre mouvement. Or, nous en avons discuté, l'écriture est soumise à ces lois comme tout autre mouvement, mais elle semble aussi posséder des caractéristiques spécifiques, comme l'indiquent les cas de patients chez lesquels elle est sélectivement abolie suite à une lésion cérébrale. Nous avons souligné en particulier que les aspects spatiaux du geste sont extrêmement peu variables *pour un individu donné* (équivalence motrice), sans doute parce que chaque allographe que nous avons appris à écrire est mémorisé dans notre cerveau sous la forme d'un programme moteur individualisé. Ainsi, tout comme la simple vision d'un ustensile familier évoque implicitement les mouvements de manipulation qui lui sont systématiquement associés, nous faisons l'hypothèse que la simple vision d'une lettre familière évoquera implicitement les mouvements d'écriture spécifiques correspondants. Si l'on reprend la dichotomie qui avait été faite en première partie, cette question se rapporte aux interactions perceptivo-motrices dans le domaine spatial. D'un point de vue fonctionnel, ces interactions, appliquées à l'écrit, sont d'une part susceptibles de participer à la catégorisation des formes graphiques : je reconnais tel caractère comme appartenant (ou pas) à la catégorie lettre de l'alphabet, en partie parce que je sais (ou pas) l'écrire. D'autre part, puisque chaque lettre est représentée individuellement sous une forme sensori-motrice en même temps que visuelle, l'évocation de la forme motrice lorsque la lettre est simplement vue pourra jouer un rôle dans des phénomènes de discrimination d'une lettre parmi d'autres, ou d'identification. Très peu d'études se sont intéressées spécifiquement à ces questions. Pourtant, un certain nombre d'arguments peuvent être tirés de différents domaines de la littérature.

1. Idéogrammes et ordre d'écriture des traits

Les caractères idéographiques chinois, ainsi que les « kanji » japonais, sont des formes très complexes composées d'un certain nombre de traits (de 1 à 23), droits ou incurvés, qui sont systématiquement écrits dans un ordre très précis. Au cours de l'apprentissage, cet ordre est rigoureusement enseigné (voir figure 10).



Figure 10. Ordre d'écriture de deux caractères idéographiques kanji

Souvent, quand un lecteur chinois ou japonais se trouve face à un caractère peu fréquent, il trace spontanément dans l'air les traits dans l'ordre approprié (« Ku-sho »), comme moyen mnémotechnique pour en retrouver le sens. Ainsi, l'information relative à l'ordre d'écriture des traits serait codée en mémoire sous forme d'un schème moteur qui ferait partie de la représentation centrale de l'idéogramme. Flores d'Arcaïs (1994) s'est intéressé à cette question en distinguant les traits « précoces » (tracés en premier) et « tardifs » des idéogrammes. Son hypothèse était que si le code moteur est automatiquement activé dans des traitements visuels des idéogrammes, les traits précoces seront activés plus rapidement et vont donc plus facilement initier le rappel du caractère en mémoire que les traits tardifs. Sur cette base, l'auteur a démontré (1) que les traits précoces, si ils sont présentés brièvement avant le caractère entier, sont des amorces plus efficaces que les traits tardifs pour la reconnaissance, et (2) que les caractères qui partagent des traits précoces sont plus fréquemment confondus par les lecteurs chinois que par des sujets n'ayant jamais appris le chinois (des sujets allemands). Les effets observés sur le traitement visuel des caractères dépendent donc de la manière dont ceux-ci sont écrits. Flores d'Arcaïs cite d'ailleurs des études ayant montré que les idéogrammes sont systématiquement « scannés » visuellement de la partie supérieure gauche à la partie inférieure droite. Selon lui, ce biais visuel s'explique simplement par le fait que ce sont le plus souvent les parties supérieures gauches qui sont écrites en premier... Les corrélats neuroanatomiques de ces effets comportementaux ont été mis en évidence par la suite par une équipe japonaise, qui a comparé en IRMf les structures cérébrales impliquées dans le rappel visuel de Kanji et dans l'écriture de ces mêmes Kanji (Kato et al., 1999; Matsuo et al., 2003). Leurs résultats montrent qu'une série d'aires motrices associatives comme le sillon intrapariétal, le cortex prémoteur gauche ou la pré-AMS qui sont activées quand les sujets écrivent, le sont aussi quand ils retrouvent les caractères en mémoire.

Cependant, l'étude des interactions perceptivo-motrices dans le traitement des caractères idéographiques est complexifiée par le fait que chaque caractère est aussi un mot, donc associé à des représentations sémantiques et linguistiques de haut niveau. En outre, les sujets japonais savent lire et écrire plusieurs systèmes graphiques qui peuvent être idéographiques (kanji), mais aussi syllabiques (katakana, hiragana), et alphabétiques (romaji, c'est à dire le système graphique occidental). L'architecture cognitive du traitement de l'écrit est donc sans doute assez particulière chez ces sujets. On peut alors se demander si les codes moteurs de l'écriture participent aussi à la perception lorsque les caractères alphabétiques sont les seuls éléments de la langue écrite.

2. Imagerie mentale de lettres

Une première réponse peut être apportée par l'étude de l'imagerie mentale de lettres. Lorsque nous avons traité des pathologies acquises de l'écrit, nous avons mentionné que certains patients agraphiques avaient aussi des difficultés à évoquer mentalement la forme des lettres (Crary & Heilman, 1988; Del Grosso Destrieri et al., 2000; Levine et al., 1988), comme si écriture et imagerie de lettres faisaient appel aux même processus. En effet, certaines données expérimentales indiquent que l'accès à la configuration visuelle d'une lettre repose partiellement sur des processus moteurs. D'abord, d'un point de vue comportemental, il semble que les segments des lettres soient spontanément visualisés dans le même ordre que celui dans lequel ils sont normalement écrits. Dans une tâche d'imagerie, les jugements sur les segments écrits en premier sont plus rapides et précis (Kosslyn et al., 1988). La dichotomie « traits précoces » / « tardifs » validée dans le cas des idéogrammes par Flores d'Arcaïs (1994) semble donc aussi avoir un sens dans le cas de caractères alphabétiques, même si ces derniers sont beaucoup moins complexes. D'autre part, des résultats obtenus en neuroimagerie montrent que des aires motrices associatives, en particulier dans le gyrus précentral dans la région de la main, sont activées lorsque des sujets se représentent mentalement la forme d'une lettre (Kosslyn et al., 1997; Raij, 1999). Les auteurs évoquent, entre autres, la possibilité d'un déclenchement implicite de séquences d'écriture pour expliquer ces activations, sans cependant insister sur ce point car elles ne sont souvent pas prédites dans de tels contextes. Des activations de nature motrice (lobule pariétal supérieur, aires prémotrices gauches) ont aussi été rapportées dans des tâches de lecture de lettres en miroir comparées à des lettres normalement orientées (Dong et al., 2000; Kassubek et al.,

2001). Ces résultats sont parfois attribués à d'éventuels mouvements des yeux. Enfin, notons que les activations prémotrices ne sont pas systématiquement retrouvées (cf Alivisatos & Petrides, 1997, dans une tâche de rotation mentale de symboles alphanumériques). Dans cette dernière étude cependant, les stimuli utilisés étaient aussi bien des chiffres que des lettres, et nous allons voir que, du point de vue moteur, ces deux classes de stimuli ne sont peut être pas traités de la même manière.

3. Quand l'écriture favorise la lecture, et quand son absence la perturbe : cas neuropsychologiques

Très rarement, des déficits d'imagerie visuelle de lettres peuvent se manifester chez des patients atteints d'alexie pure (Bartolomeo et al., 2002). Ces auteurs rapportent le cas d'un patient qui manifestait de grandes difficultés en lecture de lettres et de mots, ses performances étant généralement exactes mais très lentes. En outre, il était devenu presque entièrement incapable d'évoquer mentalement la forme d'une lettre. Toutes les autres catégories de stimuli (objets, visages), étaient traitées correctement. Ces symptômes, compatibles avec une désorganisation spécifique des représentations visuelles des lettres, étaient remarquablement améliorés si la lettre cible pouvait être tracée du bout du doigt sur la table au cours de la tâche, stratégie qui était d'ailleurs utilisée spontanément. Cette « facilitation motrice » a été rapportée pour une autre patiente, chez laquelle l'imagerie visuelle était préservée, mais la dénomination de lettres sur entrée visuelle était totalement abolie (Mycroft et al., 2002). Le nom de la lettre était systématiquement retrouvé lorsque la patiente était guidée pour la tracer, que ses yeux soient ouverts ou fermés. Le rappel était donc bien initié par l'entrée sensori-motrice. Ces cas très intéressants indiquent que l'accès à l'identité d'une lettre peut se faire en activant le programme moteur correspondant, lorsque la représentation visuelle est perturbée. Ils sont directement à mettre en parallèle avec les deux patients décrits plus hauts, qui adoptaient le même type de stratégies, en manipulant des objets qu'ils ne pouvaient plus reconnaître sur base uniquement visuelle (Magnié et al., 1999; Sirigu et al., 1991). JB, le patient étudié par Sirigu et coll., a d'ailleurs été testé dans une tâche d'appariement majuscules/minuscules. Ses performances étaient au niveau du hasard, sauf lorsqu'il était autorisé à produire des micro-mouvements des doigts.

La facilitation motrice pour la lecture avait été décrite de manière anecdotique, notamment par Déjerine (1892). Récemment, Seki et coll. (1995) l'ont étudiée plus systématiquement

comme méthode de rééducation pour deux patients alexiques. La méthode était basée sur le traçage des caractères avec le doigt, et éventuellement la copie explicite avec un crayon. Elle s'est révélée très efficace et a finalement abouti à la lecture de caractères et de mots simples, sans nécessité de « traduction kinesthésique » simultanée. L'amélioration semblait stable dans le temps (6 mois à 1 an après le traitement). Il faut noter que chez des sujets normaux, l'évocation de l'entrée motrice correspondant à une lettre donnée, par stimulation appropriée des afférences kinesthésiques, permet de retrouver le nom de cette lettre (Gilhodes, communication personnelle).

Ces données montrent que l'identité de la lettre peut être retrouvée en mémoire lorsque le mouvement d'écriture est évoqué, et même que la reconnaissance visuelle peut être partiellement restaurée si le poids des entrées sensorimotrices est accru au cours de la rééducation. Dans une étude de cas particulièrement pertinente pour notre problématique, Anderson et coll. (1990) ont montré qu'à l'inverse, lorsque les représentations motrices sont désorganisées, l'accès à l'identité des lettres sur entrée visuelle, et donc la lecture, peuvent être extrêmement perturbés. Ce cas est remarquable pour plusieurs raisons. D'abord, la patiente présentait une alexie associée à une agraphie sous une forme « pure », c'est à dire en l'absence de tout autre trouble perceptif, moteur ou linguistique (ni d'ailleurs d'imagerie mentale). L'alexie et l'agraphie avaient des degrés de sévérité comparables, et sont restées stables dans le temps. Ensuite, la spécificité en termes de catégories de matériel était très marquée, puisque l'habileté à lire et écrire les chiffres, ainsi qu'à faire des calculs complexes était parfaitement conservée. A l'inverse, toutes les tâches d'écriture de lettres aboutissaient, lorsqu'une réponse était initiée, à des séquences de traits hésitants et spatialement désorganisés, et tous les traitements visuels impliquant des lettres étaient défectueux, bien que la patiente parvienne occasionnellement à lire des mots avec une stratégie globale. Enfin, la lésion conduisant à cet ensemble de troubles était unique et très bien circonscrite (excision d'une tumeur), située dans le cortex prémoteur gauche, dans l'aire qui avait été désignée par Exner (1881) comme le centre cérébral de l'écriture. Ce cas est pour nous l'argument le plus en faveur de nos hypothèses. D'un point de vue fonctionnel, il démontre que l'intégrité des engrammes moteurs de l'écriture peut être cruciale (il est difficile de généraliser le cas d'un seul patient) pour reconnaître correctement les lettres. D'un point de vue neuroanatomique, il démontre que la destruction d'une zone corticale impliquée dans les mouvements graphiques peut conduire à la désorganisation durable des représentations cérébrales des lettres.

III.C. Effets de l'apprentissage simultané de l'écriture et de la forme visuelle des lettres

L'une des caractéristiques principales des interactions perceptivo-motrices dans le domaine de l'espace est qu'elles sont supposées acquises par l'expérience (Paillard, 1971; Paillard, 1999). Nos connaissances motrices procédurales vont pouvoir guider l'interprétation de nos perceptions dans la mesure où un percept donné a déjà été associé à un mouvement au cours de l'ontogenèse (ou de l'apprentissage). C'est ici que notre problématique rencontre des questions centrales dans les Sciences de l'Education. En effet, si l'on fait l'hypothèse de l'occurrence d'interactions perceptivo-motrices dans le cas particulier de l'écrit, cela implique une réflexion sur les conditions de la mise en place des représentations centrales des lettres, au cours de l'apprentissage premier de la lecture et de l'écriture. On peut se demander si, effectivement, certains indices permettent d'avancer que le fait de former la lettre par l'écriture est un facteur pertinent dans l'acquisition de ces représentations. Des enfants qui n'apprendraient les lettres que par l'intermédiaire de la vision seraient-ils capables de les reconnaître aussi aisément que s'ils les avaient simultanément écrites ? Si non, quel type d'information la motricité scripturale est-elle susceptible d'apporter pour faciliter l'apprentissage ?

1. Les premières étapes de l'apprentissage de la lecture et de l'écriture

Avant de tenter de répondre à ces questions avec les données de l'expérimentation, il est légitime de se demander ce qui se passe exactement dans la pratique. On peut par exemple consulter les programmes officiels de l'éducation nationale (BO hors série n°1 du 14 février 2002, <http://www.education.gouv.fr/bo/2002/hs1/default.htm>). Voilà ce que l'on y lit : « L'apprentissage de la lecture et celui de l'écriture sont parfaitement complémentaires. L'un et l'autre sont en permanence menés de pair et se renforcent mutuellement. (...) Il est essentiel que dans la classe ils soient abordés au sein des mêmes séquences dans des alternances rigoureusement pensées. *Apprendre à écrire est l'un des meilleurs moyens d'apprendre à lire.* » (programme du cycle des apprentissages fondamentaux). « *C'est dans les activités d'écriture, non de lecture, que les enfants parviennent à vraiment 'voir' les lettres qui distinguent les mots entre eux.* À cet égard, la reconnaissance globale de mots écrits sur des étiquettes est un exercice insuffisant. Les activités graphiques d'écriture, dans la mesure où

elles individualisent des lettres, fournissent un matériel important pour la construction du principe alphabétique. Il en est bien sûr de même pour les exercices de copie, à condition qu'ils soient verbalisés.» (programme de l'école maternelle).

Ces extraits nous apprennent qu'il est explicitement recommandé aux enseignants de favoriser précocement de fortes interactions entre lecture et écriture. Les raisons qui en sont données sont que les deux habiletés sont complémentaires. Et en effet, certains psychologues de l'éducation affirment que lecture et écriture reposent en partie sur les mêmes connaissances (procédurales, métalinguistiques..., voir Fitzgerald & Shanahan, 2000). Il est cependant souligné qu'à des âges aussi précoces, les relations sont plutôt polarisées dans le sens de l'apport de l'écriture à la lecture. Comme l'ont démontré Ferreiro et Gomez Palacio (1988), c'est en produisant du langage écrit que le jeune enfant va en comprendre peu à peu les principes, comme par exemple le fait que les mots sont formés de lettres, et que chaque lettre représente un son (voir aussi Zerbato-Poudou, 2000). Cette idée avait déjà été développée dans des méthodes pédagogiques plus anciennes : voici par exemple ce que Montessori (1912) écrivait, après avoir décrit sa méthode pour enseigner les prémisses de l'écriture (méthode qui consiste à suivre les contours de lettres rugueuses avec les doigts, avant de les tracer sur le tableau). « We have, in addition to this, begun the teaching of reading at the same time that we have been teaching writing. When we present a letter to the child and enunciate its sound, *he fixes the image of this letter by means of the visual sense, and also by means of the muscular-tactile sense*. By teaching these two acts contemporaneously, or, better, by their fusion, we place the child before a new form of language without determining which of the acts constituting it should be most prevalent.» (<http://digital.library.upenn.edu/women-/montessori/method/method-XVII.html>)

Mais que sait-on exactement des processus perceptifs, moteurs ou cognitifs qui sous-tendent la reconnaissance et l'écriture de lettres chez les enfants prélecteurs ou apprentis lecteurs/scripteurs ? Encore une fois, malgré la contemporanéité des apprentissages, on note qu'écriture et reconnaissance de lettres sont traitées séparément, tant la subordination de l'écriture à la lecture semble prégnante dans les esprits. D'autre part, il existe très peu de données disponibles sur les premiers stades de ces acquisitions. Pourtant, ces étapes de l'apprentissage, négligées par les recherches notamment en neurosciences, sont sans doute beaucoup plus importantes qu'on ne pourrait le croire. Une étude récente en neuroimagerie montre par exemple que les réseaux cérébraux sous-tendant la lecture sont déjà en place à l'âge de 7 ans (Gaillard et al., 2003). Dès 4 ans, parfois encore plus tôt, l'enfant va

commencer à manifester de l'intérêt et de la curiosité pour le langage écrit (Ferreiro & Gomez Palacio, 1988; Graham & Weintraub, 1996). Dans ces étapes précoces du développement, il va commencer à catégoriser, à discriminer et à nommer les lettres. Certains auteurs utilisent le concept de « conscience graphémique » pour qualifier ces habiletés (Fitzgerald & Shanahan, 2000). Pour Ellis (1993), elles sont fondamentales car elles marquent la création par l'enfant du système d'analyse visuelle qui à terme va être le processus de base de la lecture experte. En effet, avons déjà noté plus haut que la connaissance des lettres est un bon indice de la facilité avec laquelle l'élève apprendra ensuite à lire (Adams, 1990; Fitzgerald & Shanahan, 2000; Näslund & Schneider, 1996). La discrimination de formes graphiques et de lettres a été bien étudiée par Gibson et coll. (1962) avec des enfants de 4 à 8 ans dans une tâche d'appariement, en faisant varier différentes dimensions spatiales dans les distracteurs. Une analyse des confusions avec la cible montre que les erreurs de perspective sont les plus nombreuses, ainsi que les erreurs d'orientation. Les sujets semblaient en outre manifester plus de difficultés à discriminer des formes courbes que des formes droites et des formes asymétriques que des formes symétriques. Entre 4 et 8 ans les taux d'erreurs diminuent et la stratégie se modifie légèrement : les plus jeunes transfèreraient aux formes graphiques la connaissance des invariants acquise à partir des objets solides (c'est à dire qu'un objet conserve la même identité quelle que soit son orientation), et font donc beaucoup plus d'erreurs d'orientation ; les plus âgés utiliseraient leur apprentissage formel de l'écrit pour déterminer quelles sont les dimensions qui sont cruciales pour différencier deux formes graphiques. Notons cependant que Courrieu et De Falco (1989) montrent que les confusions de lettres chez des enfants d'âge préscolaire et des adultes présentent de grandes similarités (confusion de lettres « réversibles », comme b-d, p-q, f-t, n-u), bien qu'elles soient nettement plus fréquentes chez les enfants. La tendance à confondre une lettre avec son image en miroir a été évoquée comme l'une des manifestations de troubles de l'apprentissage de la lecture (Liberman et al., 1971; Terepocki et al., 2002). Cette dimension d'orientation spatiale est particulièrement intéressante car elle constitue une distinction majeure entre les lettres et d'autres catégories d'objets.

En parallèle de ces acquisitions, l'enfant va aussi progressivement apprendre à faire la différence entre écriture et dessin, et à tracer ses premières lettres, après être passé par différents stades dans lesquels ses productions étaient d'abord des gribouillis, puis des pseudolettres bien différenciées (Ferreiro & Gomez Palacio, 1988). Nous disons « en parallèle », mais nous devrions plutôt dire « simultanément », puisque, remarque plutôt triviale mais importante, ces sont les mêmes lettres que l'enfant apprendra à la fois à

reconnaître (c'est à dire à labelliser sur la base d'une analyse visuelle) et à écrire, souvent par l'intermédiaire du vecteur motivant qu'est son prénom (Treiman & Broderick, 1998). Dans le cadre scolaire, l'apprentissage premier de l'écriture se fait généralement par imitation des gestes de l'enseignant et par copie d'un modèle (Graham & Weintraub, 1996). Il semblerait que l'apprentissage soit plus efficace si l'enseignant incite l'élève à verbaliser la séquence d'actions qu'il utilise pour écrire une lettre (Zerbato-Poudou, 1994; Zerbato-Poudou, 2000). A ce moment, l'enfant se base essentiellement sur une stratégie rétroactive, et utilise des programmes moteurs de petite taille (de l'ordre du trait). Avec l'augmentation de ses capacités de mémoire de travail, il va peu à peu devenir capable de programmer plusieurs traits en parallèle et donc de construire des programmes moteurs dont les unités seront plus larges (lettres) (Zesiger, 1995; Nihei, 1983).

2. Données sur le rôle de la motricité graphique dans l'apprentissage de la lecture

Il existe toute de même un certain nombre de données sur les effets de l'apprentissage simultané de la forme visuelle de la lettre et du mouvement d'écriture. Du point de vue purement statistique d'abord, plusieurs études dont on pourra trouver le détail dans la revue de Graham et Weintraub (1996, p34-35) ont établi des corrélations significatives entre la fluence de l'écriture et la rapidité de lecture. A l'inverse, il semble que le nombre d'erreurs de forme produites en écriture par des enfants de maternelle prédise de manière satisfaisante les performances subséquentes en lecture, ainsi que les évaluations des enseignants sur l'aptitude de l'élève à entrer au cours préparatoire. Ces données, comme toutes les corrélations, sont néanmoins assez difficiles à interpréter. Le rôle facilitateur de l'écriture est globalement discuté, les expériences consacrées à ce sujet donnant des résultats contradictoires. Pour Adams (1990), par exemple, la copie ne semble pas un moyen particulièrement efficace pour améliorer la reconnaissance de lettres (p356). Cette stratégie est pourtant, comme nous l'avons déjà souligné plus haut, la méthode classique d'apprentissage des caractères idéographiques chez les enfants chinois ou japonais, et nous avons établi que l'acte de copie répétée marque la représentation centrale des caractères. Naka et Naoi (1995), ont étudié cette question en faisant apprendre à de jeunes adultes des formes graphiques inconnues par copie ou vision seule. La méthode de copie donnait de meilleurs résultats, mais seulement dans des tâches de rappel libre par écrit, pas de reconnaissance. Ces effets ne seraient pas « culturels »,

puisque'ils apparaissaient aussi bien chez des sujets américains que japonais. Dans une autre étude, Naka (1998) a travaillé avec des enfants de 7-11 ans, avec le même type de protocole. Encore une fois, les résultats montraient un effet plus important de la motricité dans une tâche de rappel libre, surtout chez les enfants les plus jeunes. Dans cette étude la reconnaissance n'a pas été testée. Hulme (1979) a démontré avec des enfants de 8-9 ans qu'une méthode de traçage qui consistait à suivre les contours de la forme avec l'index était efficace pour le rappel de formes graphiques dans une tâche de choix forcé, par rapport à une situation simplement visuelle. Cet avantage de la condition motrice disparaissait si une tâche motrice interférente était intercalée entre l'apprentissage et le rappel. Plus tard, Hulme et coll. (1987) ont reproduit ces effets pour différents groupes d'âge dont des enfants jeunes (3-4 ans), dans des tâches de dénomination et de reconnaissance de formes graphiques. Enfin, Courrieu et De Falco (1989) ont travaillé directement avec des enfants prélecteurs, afin de tester deux méthodes pour leur faire apprendre des lettres « difficiles », c'est à dire les plus fréquemment confondues les unes avec les autres (p-q, n-u...). L'apprentissage était soit dynamique (les enfants devaient repasser sur les lettres en suivant des consignes sur les sens de production marquées par des flèches), soit segmental (les enfants devaient recomposer les lettres à partir de traits constituants découpés dans du papier). L'apprentissage segmental s'est avéré bénéfique pour améliorer la discriminabilité entre une lettre et son image en miroir, mais pas l'apprentissage dynamique. Dans cette dernière étude par conséquent, la motricité n'avait pas d'effet sur la perception subséquente des lettres.

On constate que les résultats de ces études ne sont pas concluants. Il est difficile de les comparer entre elles car elles ont utilisé des modes d'évaluation des performances et des méthodes d'apprentissage (copie, traçage, traçage dirigé...) très variables. D'autre part elles portaient sur des groupes d'âge différents. Enfin, dans tous les cas, les performances après apprentissage n'étaient testées qu'à court terme.

Revenons un moment aux programmes de l'école maternelle. Un peu plus loin dans le texte, on note : « L'usage parallèle du clavier de l'ordinateur, dont les touches sont repérées par des capitales d'imprimerie, permet d'utiliser les lettres avant même de savoir les tracer. Il renforce de manière particulièrement heureuse l'apprentissage de l'écriture. » Il est vrai que même en dehors du contexte de l'école, les ordinateurs sont désormais tellement répandus qu'il est probable qu'ils tendent à devenir l'un des tout premiers outils de familiarisation des tout petits avec l'écrit. La seconde partie de l'extrait est plus surprenante. Est-il réellement démontré que la découverte des lettres par le clavier d'ordinateur favorise ensuite l'apprentissage de

l'écriture ? Si oui, par quel(s) processus ? Quelques études se sont penchées sur cette question, dans le domaine des sciences de l'éducation. Elles consistaient à comparer l'effet de l'apprentissage de mots par écriture traditionnelle ou par dactylographie sur les compétences des sujets en orthographe. La première (Cunningham & Stanovich, 1990) a mis en évidence un avantage de l'écriture manuscrite, chez des enfants de 6-7 ans. Les secondes (Vaughn et al., 1992; Vaughn et al., 1993) n'ont pas trouvé de différence entre les deux méthodes, ni chez des enfants ayant un parcours scolaire normal, ni chez des enfants souffrant de troubles d'apprentissage. L'orthographe reste cependant assez éloignée de nos préoccupations et les hypothèses relatives au rôle de la motricité dans ce domaine sont moins immédiates. Nous l'avons déjà mentionné à plusieurs reprises, nous faisons l'hypothèse que si la motricité intervient d'une quelconque manière dans l'apprentissage de l'écrit, ce sera davantage à un niveau beaucoup plus bas, et que le processus influencé sera le traitement spatial qui préside à la reconnaissance visuelle de la lettre. Dans ce cadre, et à notre connaissance, il n'existe pas de données sur la contribution éventuelle de la frappe des lettres sur un clavier. Quelles pourraient être les répercussions de ce nouveau mode d'écriture, de cette nouvelle motricité graphique, sur la représentation centrale de l'écrit que ces enfants sont en train de construire ? Si l'éducation nationale préconise une utilisation « parallèle » des claviers dans la classe, nous nous focaliserons par la suite sur les effets d'une utilisation exclusive, en faisant l'hypothèse qu'étant données les caractéristiques propres à la motricité dactylographique, cette dernière ne sera pas une source d'information pertinente pour l'apprentissage de la forme des lettres.

Pour résumer, retenons que dans les toutes premières étapes de l'apprentissage de l'écrit, perception et production de lettres sont très liées et même quasi- fusionnées, à la fois dans les pratiques pédagogiques et dans les comportements spontanés de l'enfant. Nous avons constaté que, malheureusement, cet aspect de l'apprentissage n'a pas réellement été analysé systématiquement. Il reste que, dans notre problématique, les enfants prélecteurs constituent un excellent « modèle ». En effet, d'éventuels effets de la motricité graphique sur la perception de lettres chez de tels sujets ne pourront pas être expliqués par des facteurs de plus haut niveau, comme des connaissances procédurales ou linguistiques spécifiques à la lecture ou l'écriture expertes.

PARTIE EXPERIMENTALE

I. Activations cérébrales au cours de la perception de lettres chez l'adulte

La première approche que nous avons mise en œuvre pour éprouver l'hypothèse d'interactions perceptivo-motrices dans la perception de caractères alphabétiques a consisté à déterminer le réseau cérébral mis en jeu, lorsque des sujets percevaient des lettres. Notre but était de déterminer si des régions motrices étaient incluses dans ce réseau. Cela aurait constitué un bon indice de l'intervention de processus moteurs dans le traitement visuel de lettres. Cette idée générale a constitué le point d'ancrage de l'étude.

Nous voulions cependant pouvoir vérifier que d'éventuelles activations motrices obtenues dans cette situation perceptive étaient bien en rapport avec des mouvements d'écriture, et non avec d'autres types de mouvements. Pour cela, nous avons eu recours à deux stratégies :

- d'une part, nous avons comparé les réponses neurales à la présentation de formes connues et inconnues (des lettres et des « pseudolettres »). Si nos hypothèses étaient fondées, les lettres, qui sont des formes graphiques surappries et codées en mémoire sous forme d'un programme moteur spécifique, devaient évoquer automatiquement des activations dans les régions cérébrales sous-tendant l'écriture. Par contre, les pseudolettres ne pouvaient pas évoquer de telles activations, puisque ces dernières, n'ayant jamais été écrites par les sujets, ne correspondent à aucune représentation motrice prédéfinie en mémoire.
- d'autre part, nous avons également mesuré l'activité cérébrale des sujets lorsqu'ils écrivaient réellement, afin de marquer les structures cérébrales effectivement impliquées dans l'écriture, et d'avoir un point de comparaison direct.

Nous avons utilisé l'Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle (IRMf), technique qui connaît actuellement un développement technique et méthodologique extrêmement rapide (Raichle, 2003). A l'inverse de l'EEG ou la MEG, qui permettent de mesurer directement l'activité neuronale à la surface du scalp, l'IRMf, tout comme la TEP, fait un détour en allant mesurer des changements métaboliques à l'intérieur du cerveau. Plus précisément, elle est sensible au contraste BOLD (Blood Oxygenation Level-Dependant, Ogawa et al., 1990) qui reflète le rapport de concentration entre l'hémoglobine oxygénée et déoxygénée dans le sang. L'augmentation du signal BOLD dépend donc de l'augmentation du débit sanguin dans une

région cérébrale donnée en réponse à un événement donné, lorsque les neurones de cette région consomment plus d'oxygène (réponse hémodynamique). L'IRMf constitue une mesure indirecte de l'activité neuronale, ce qui reste l'une de ses plus importantes limitations. Pourquoi est-ce une limitation ? D'abord parce que la réponse hémodynamique met quelques secondes pour arriver à son pic, et environ 20 secondes pour revenir à son niveau initial à partir du moment où la stimulation s'arrête. Ceci limite considérablement la résolution temporelle de l'IRMf. Ensuite parce que la relation exacte entre le signal BOLD et l'activité neuronale n'est pas encore tout à fait déterminée. On pourra trouver dans l'article de synthèse de Logothetis paru récemment (2003) une description détaillée des différentes mesures de l'activité neurophysiologique et de leurs relations avec le signal BOLD. Cet auteur et son équipe (Logothetis et al., 2001) ont réussi à mesurer simultanément la réponse BOLD, les champs de potentiels locaux (Local Field Potentials, LFPs) et l'activité de décharge multi-unitaire (Multi-Unit spiking Activity, MUA) en réponse à des stimulations visuelles chez le singe anesthésié, ceci malgré des contraintes techniques très fortes. Leurs données indiquent que le paramètre neurophysiologique le mieux corrélé avec la réponse BOLD sont les LFPs, qui reflètent principalement les signaux d'entrée de la population neuronale considérée, c'est à dire l'activité synaptique (la MUA dépendant de la décharge effective des neurones). Cela signifie que le signal mesuré en IRMf dans une aire donnée serait davantage le reflet de l'influence de l'activité entrante et du traitement local que le reflet de l'activité de décharge proprement dite. Cependant, sauf dans certains cas particuliers, LFPs, MUA et signal BOLD sont bien corrélés.

Malgré ces limitations dont il faut avoir conscience dans l'interprétation des données, l'IRMf permet de localiser des changements d'activité neurale avec une précision de l'ordre du millimètre. Elle a été un outil de choix pour avancer dans notre problématique.

I.A. Comparaison des activations cérébrales au cours de la perception et de l'écriture de lettres et de pseudolettres

Longcamp M. Anton J.L., Roth M. & Velay J.L. (2003) Visual presentation of single letters activates a premotor area involved in writing, *Neuroimage*, 19(4):1492-1500

1. Méthodes

a. Protocole

Sujets

Onze sujets droitiers adultes (7 hommes et 4 femmes, âge moyen 25 ans +/- 2 ans) de langue maternelle française ont participé aux expériences. La latéralité manuelle a été évaluée avec l'inventaire d'Edinburgh (Oldfield, 1971). Les scores étaient échelonnés entre +80 et +100, avec une moyenne de +93. Tous les sujets utilisaient uniquement leur main droite pour écrire, et avaient appris à écrire de la main droite.

Nous avons vérifié qu'aucun de ces sujets n'avait d'antécédents de dyslexie ou d'autres troubles neurologiques. Tous ont donné leur consentement informé. Le protocole a reçu l'accord du C.C.P.P.R.B. Marseille 1 sous le numéro 02010.

Design expérimental

Le design était « en blocs », c'est à dire que les stimuli étaient présentés par blocs de même condition. Il était constitué de deux parties, dans lesquelles les stimuli visuels étaient les mêmes, mais la tâche différait.

Au cours de la première partie (« Perception », 3 sessions d'enregistrement), les sujets avaient simplement pour consigne de regarder attentivement les stimuli. Il n'y avait donc pas de tâche à proprement parler, mais simplement perception visuelle passive. Ce choix a été dirigé par deux raisons : d'abord, parce que nous nous intéressions à des activations dans des régions motrices liées à la main, il était nécessaire d'éviter toute activité motrice réalisée dans le cadre d'une tâche. En effet, des activations induites par la préparation d'une réponse manuelle auraient pu interférer avec les activations d'intérêt (voir Hanakawa et al., 2002, pour une discussion à ce sujet). Ensuite, parce que nous ne voulions pas orienter massivement les traitements perceptifs ou cognitifs des formes présentées, par exemple dans une tâche visuospatiale ou linguistique (Niederbuhl & Springer, 1979). Comme nous le discuterons plus

bas, les processus attentionnels et verbaux sont susceptibles d'induire des activations cérébrales motrices. Nous avons vérifié que les sujets avaient été attentifs en réalisant, avant de débiter la seconde partie, un court test dans lequel nous présentions des lettres et des pseudolettres qui étaient apparues ou pas durant les trois premières sessions. Tous les sujets ont répondu correctement.

Au cours de la seconde partie du design, (« Ecriture », 3 sessions d'enregistrement) les sujets devaient copier les stimuli avec un crayon sans mine, sur une planche de bois qui avait été préalablement fixée sur leur ventre à l'aide d'une lanière attachée à la taille. Cette seconde partie était systématiquement conduite après la perception, afin d'éviter les stratégies d'écriture mentale au cours de la perception. Lorsqu'ils débutaient les sessions de perception, les sujets n'étaient pas informés qu'ils auraient ensuite à écrire les stimuli.

Les stimuli étaient de trois types : des lettres capitales d'imprimerie, des pseudolettres (formes graphiques sans signification), et un stimulus de contrôle (figure 11).

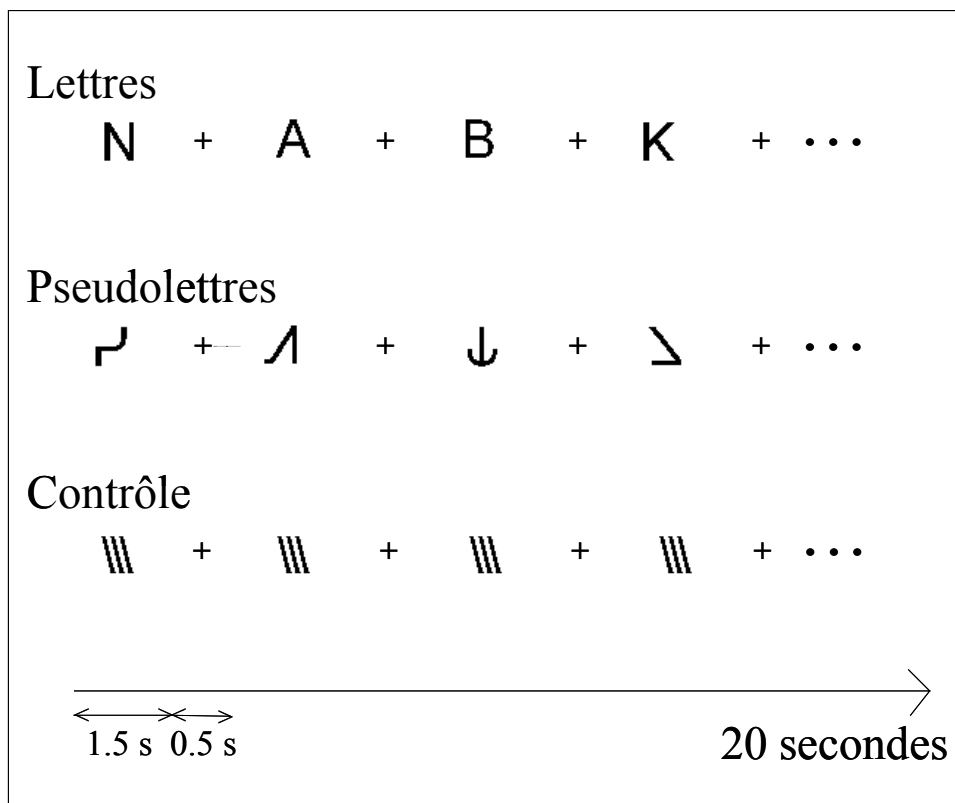


Figure 11. conditions expérimentales

Les stimuli apparaissaient séquentiellement en blocs de 20 secondes. Il y avait 5 blocs de chaque condition par session d'enregistrement.



Figure 12. Série de pseudolettres

Les pseudolettres ont été conçues pour être visuellement équivalentes aux lettres, en termes de taille, ainsi que de nombre et d'épaisseur de traits (figure 12). Le stimulus de contrôle était constitué de trois traits obliques (hachures). Ces stimuli étaient présentés séquentiellement, par blocs de 20 secondes, au centre de l'écran sur un angle visuel de moins d'un degré. La disparition d'un stimulus était immédiatement suivie de l'apparition d'une croix de fixation. Ces spécifications étaient destinées, en plus de consignes spécifiques données aux sujets, à éviter les mouvements des yeux. Chaque stimulus durait 2 secondes (1.5s de stimulation et

0.5s de fixation). Une session était constituée de 15 blocs, 5 de chaque condition, présentés dans un ordre pseudo-aléatoire. La stimulation visuelle était générée sur un PC, envoyée sur un vidéoprojecteur situé dans la chambre du scanner, et projetée sur un écran. Le sujet, à l'intérieur du scanner, voyait les stimuli par l'intermédiaire d'un miroir placé au dessus de ses yeux et orienté vers l'écran.

b. Acquisition des données

Les données ont été acquises sur un imageur corps-entier 3-Teslas MEDSPEC 30/80 ADVANCE (Brucker, Ettlingen, Allemagne), équipé d'une antenne tête circulaire polarisée. Pour chaque sujet, nous acquérions dans un premier temps une image structurale haute résolution pondérée en T1 (séquence inversion-recovery, 1 X 0.75 X 1.22 mm) couvrant tout le cerveau et parallèle au plan Commissure Antérieure-Commissure postérieure. Pour l'imagerie fonctionnelle, nous avons utilisé une séquence echoplanar (EPI) pondérée en T2*, couvrant tout le cerveau avec 30 coupes axiales entrelacées de 3.5 mm d'épaisseur et 1 mm de gap (temps de répétition = 2500 ms, temps d'écho = 35 ms, flip angle = 80°, field of view = 19.2 X 19.2 cm, matrice de voxels de 3 X 3 X 3 mm de 64 X 64). Cent trente deux volumes étaient acquis dans chaque session.

c. Traitement des données

Les données ont été traitées avec le logiciel SPM99 (<http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/>).

Prétraitements

Les analyses statistiques opérées sur les données fonctionnelles se basent sur l'hypothèse qu'un voxel donné représente toujours la même partie du cerveau (Friston, 2003). Cela signifie d'une part qu'une partie du cerveau donnée ne doit pas s'être déplacée dans l'espace au cours de l'examen, et d'autre part, que lorsque l'on compare différents sujets, il faut en quelque sorte rendre leurs anatomies artificiellement identiques, pour qu'un voxel représente la même zone. En outre, toutes les coupes d'un volume sont sensées avoir été acquises au même instant, ce qui n'est pas le cas, puisqu'un volume est échantillonné sur la durée d'un temps de répétition (pour nous 2.5 s). Le but des prétraitements est d'approcher le mieux possible ces hypothèses spatiales et temporelles.

La chaîne suivie pour les prétraitements est indiquée en figure 13. Pour chaque session, nous avons commencé par éliminer les 4 premiers volumes, pour tenir compte du temps nécessaire à la stabilisation du signal. Nous avons ensuite corrigé le décalage temporel d'acquisition des coupes dans chaque volume en homogénéisant, par interpolation temporelle, l'instant d'acquisition de toutes les coupes à un instant commun (instant d'acquisition de la 27^e coupe, 14^e échantillon temporel). Après cette étape, nous avons aussi écarté les deux premiers et deux derniers volumes pour prévenir d'éventuelles erreurs d'interpolation. L'ensemble des volumes résultants a été corrigé pour les mouvements de la tête en réalignant toutes les images de la session sur la première image sur la base de transformations rigides, et l'image fonctionnelle moyenne corrigée a été écrite. Cette image a servi à déterminer les paramètres de normalisation, par référence au modèle (« template ») EPI, fourni avec SPM99. Ces paramètres ont ensuite été appliqués à l'ensemble des volumes fonctionnels du sujet, qui ont été ré échantillonnés avec une taille de voxel isotropique de 2 mm. Les données ont ensuite été lissées avec un filtre gaussien de 6 mm FWHM (full width at half maximum).

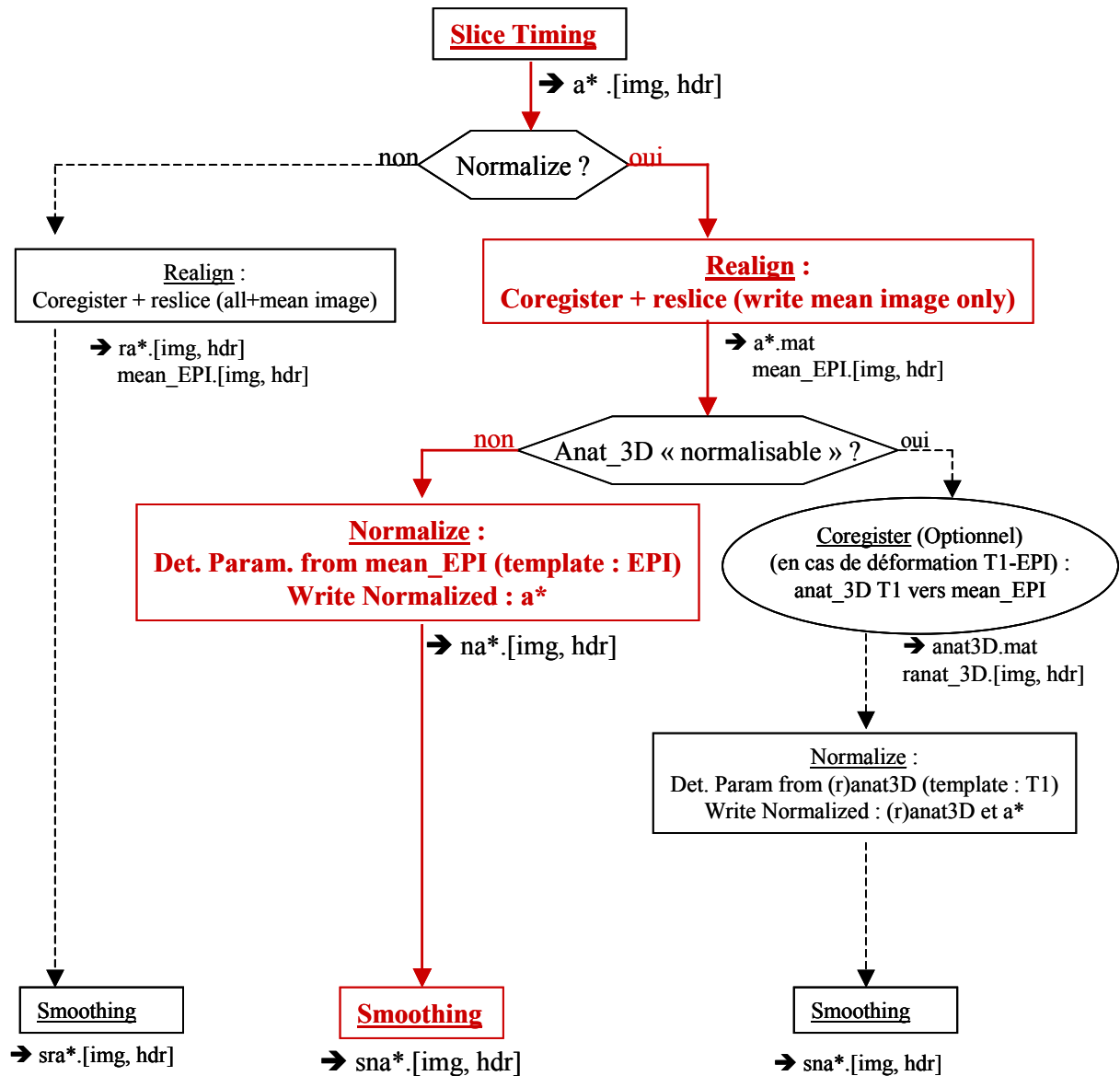


Figure 13. Chaîne de prétraitements des images fonctionnelles utilisée (en rouge), parmi les autres chaînes possibles

Lorsque l'acquisition est entrelacée, on commence par corriger le décalage temporel entre coupes, avant d'appliquer les algorithmes de correction du mouvement. Les images ont été normalisées à partir de l'image fonctionnelle moyenne. (d'après Dauchot, Anton et Pelegrini-Issac « SPM99, guide pratique pour utilisateur novice » http://irmfmrs.free.fr/formation/traitemement_des_donnees/spm99doc/warning.html)

Toutes ces étapes de prétraitements sont évidemment des sources potentielles d'erreurs, puisqu'à chaque étape, le signal est transformé. La tendance actuelle est à les minimiser le

plus possible¹. Par exemple, on estime que si les déplacements de la tête ont une amplitude inférieure à 1 mm, il n'est pas nécessaire de recalibrer les volumes. L'étape de prétraitement la plus délicate reste cependant la normalisation spatiale, qui est un choix méthodologique important. En effet, si tous les cerveaux individuels ne se trouvent pas dans un espace commun, l'espace du « template », qui équivaut approximativement à l'espace du cerveau de Talairach et Tournoux (1988), il est impossible de réaliser des analyses statistiques de groupe. L'hypothèse qui sous-tend la normalisation est que, en mettant tous les cerveaux dans la même « boîte », on va aboutir à faire se superposer les mêmes zones fonctionnelles chez tous les sujets. Pourtant, la variabilité anatomique inter-individuelle est telle que des régions fonctionnellement homologues chez deux sujets donnés ne seront pas forcément localisées au même endroit du cerveau normalisé. A l'inverse, des activations qui sembleront localisées au même endroit du cerveau normalisé ne correspondront pas forcément à des régions fonctionnellement identiques... Ces problèmes, contournés en partie par le lissage spatial des données, conduisent néanmoins à une perte de précision dans la localisation des activations (Brett et al., 2002b). C'est pourquoi, en parallèle aux analyses de groupe, de manière à vérifier que les effets étaient de même nature chez tous les sujets, nous avons mis en oeuvre une analyse en régions d'intérêt (ROI). L'analyse en ROI se concentre sur une région particulière, définie sujet par sujet, selon des critères anatomiques (par exemple le striatum gauche) ou fonctionnelle (par exemple le cortex visuel primaire). Pour cette analyse en ROI, et en vue de conserver la précision anatomique individuelle, les données n'ont pas été normalisées.

Analyses statistiques

L'analyse statistique était basée sur le modèle linéaire général (Friston et al., 1995). Ce cadre statistique, dont la régression linéaire ou le test t sont des cas particuliers, se résume dans l'équation suivante : $Y = X\beta + \varepsilon$.

Dans SPM99, Y est la variable de réponse (le signal, c'est à dire le vecteur correspondant à la série temporelle d'un voxel donné) ; X est la matrice du design expérimental, dans laquelle chaque colonne (régresseur) correspond à une des conditions expérimentales manipulées ; β le vecteur des paramètres, ou coefficients de régression ; et ε est le terme d'erreur c'est à dire la partie du signal non expliquée par le modèle.

¹ J.B. Poline, Journées de formation MEG/EEG IRMF, Orsay, Septembre 2003.

Les comparaisons planifiées, ou contrastes, sont des tests statistiques sur des combinaisons linéaires des paramètres estimés du modèle (β).

Au cours de la première étape des analyses, nous avons donc spécifié, pour chaque sujet, un modèle en effets-fixes (« fixed effects »), dans lequel les conditions expérimentales étaient représentées par des fonctions « boxcar » (en créneau) convoluées avec la fonction de réponse hémodynamique. Ce modèle a été estimé dans chaque voxel pour déterminer les valeurs des coefficients β . Afin que l'estimation soit le plus efficace possible, nous avons ajusté le signal en supprimant les dérives basse-fréquence (respiration, rythme cardiaque) en appliquant un filtre passe-haut (80s de période de coupure), et nous avons également lissé les données temporellement avec un filtre gaussien de 4 secondes. Lorsque les paramètres du modèle ont été estimés, nous avons calculé trois contrastes statistiques (combinaisons linéaires des paramètres estimés du modèle) pour chaque situation expérimentale et pour chaque sujet : « lettres vs. contrôle », « pseudolettres vs. contrôle », et « lettres vs. pseudolettres ».

La seconde étape a consisté en une analyse en effets aléatoires (« random effects »). Ce type d'analyse, de plus en plus couramment utilisée en neuroimagerie fonctionnelle, permet de dresser des conclusions à l'échelle de la population car elle tient compte de la variance inter-individuelle. Il consiste simplement à effectuer un test t à un échantillon sur les images de contrastes de tous les sujets. Nous avons réalisé trois tests t, un pour chaque contraste d'intérêt. Les cartes statistiques ainsi obtenues ont été seuillées à $p < 0.001$, non corrigé pour les comparaisons multiples. Seuls les clusters de 20 voxels contigus ou plus sont rapportés.

Afin de déterminer les régions cérébrales activées pour le traitement de formes graphiques en général, indépendamment de leur niveau de familiarité, nous avons réalisé un masquage inclusif du contraste « lettres vs. contrôle » par le contraste « pseudolettres vs. contrôle ». Cette procédure permet de visualiser les activations communes aux deux contrastes, c'est à dire significatives dans les deux cas.

Afin de déterminer les régions cérébrales activées spécifiquement pour le traitement des lettres, nous avons considéré le contraste « lettres vs. pseudolettres ».

Ainsi, nous avons pu avoir accès aux effets cérébraux régionaux aspécifiques et spécifiques dans le traitement visuel (ou l'écriture) de lettres.

Où se trouvent les activations ?

La désignation anatomique précise des activations, c'est à dire des ensembles de voxels (clusters) montrant un effet significatif du facteur expérimental, constitue la dernière étape de l'analyse des données, et peut être la plus délicate. Il existe globalement trois manières de

désigner la localisation d'une activation en termes anatomiques : par les *coordonnées de Talairach* du voxel le plus fortement activé à l'intérieur du cluster ; par un *label macroanatomique (sillon ou gyrus)* ; par un *label microanatomique (généralement aire de Brodmann)* (Brett et al., 2002b). Les deux dernières méthodes sont généralement visuelles et subjectives. Elles consistent à superposer les cartes statistiques sur des coupes anatomiques, par exemple celles du cerveau « canonique » de SPM, ou celles de l'anatomie normalisée de l'un des sujets du groupe, et à comparer les données avec les planches d'un atlas. La localisation en labels macroanatomiques est limitée lorsque les données individuelles ont été normalisées, car, sauf pour les sillons majeurs, les structures macroanatomiques sont très variables d'un sujet à l'autre à la fois en position et en configuration (voir Brett et al., 2002b) pour une synthèse des éléments de variabilité anatomique inter-individuelle). Une activation que l'on considèrera par exemple dans le gyrus temporal inférieur sur l'ensemble du groupe pourra refléter des activations dans des structures spatialement proches mais anatomiquement et/ou fonctionnellement différentes chez les différents sujets pris en compte, et superposées artificiellement du fait de la normalisation. Le même raisonnement s'applique pour la localisation en labels microanatomiques : la localisation et l'étendue spatiale des aires architectoniques est elle aussi largement variable d'un sujet à l'autre. D'autre part, on utilise généralement l'atlas de Talairach et Tournoux (1988) pour faire correspondre visuellement une activation avec une aire de Brodmann donnée. Or il faut savoir que ces auteurs ont estimé la position des aires de Brodmann dans leur atlas plutôt approximativement, en comparant la surface du cerveau de leur atlas à la carte publiée par Brodmann.

Le système de coordonnées stéréotaxiques développé dans l'atlas de Talairach et Tournoux (1988) est sans doute le label le plus objectif et précis car il indique une position dans les trois dimensions de l'espace du cerveau normalisé et non une structure anatomique (voir figure 14). Les coordonnées sont une manière numérique et non plus nominale de localiser les activations. Elles sont d'ailleurs un point de repère très utilisé pour comparer des études entre elles. Cependant, les résultats, s'il n'étaient présentés que sous cette forme, seraient difficiles à lire et à appréhender rapidement.

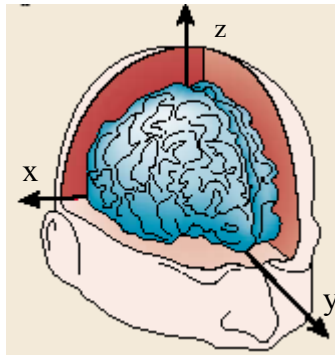


Figure 14. Repère de coordonnées dans un cerveau en trois dimensions, pour la lecture des coordonnées de Talairach

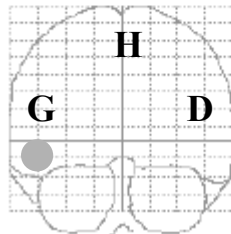
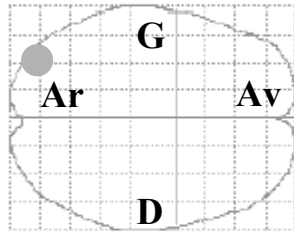
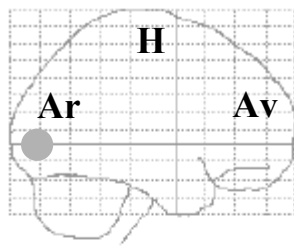
Les coordonnées sont positives vers le haut (z), l'avant (y) et la droite (x). Elles ont pour point d'origine la commissure antérieure. L'axe y est aligné sur le segment joignant la commissure postérieure à la commissure antérieure. (D'après Brett et al, 2003)

Nous avons choisi de présenter les activations de deux manières. D'abord, afin qu'elles puissent être visualisées globalement, nous les avons figurées sur le « glass brain », le cerveau de verre de SPM. En parallèle, les points d'activation d'intérêt ont été superposés sur des coupes anatomiques dans les trois dimensions. Ces représentations sont détaillées dans la figure 15. Ensuite, les activations sont décrites avec les trois types de labels, sous forme de tableaux. Chaque ligne du tableau correspond à un cluster. Sont décrites :

- la position macro-anatomique, déterminée à partir de l'atlas de Duvernoy (1999) et entre parenthèses l'aire de Brodmann correspondant approximativement, déterminée à partir de l'atlas de Talairach et Tournoux (1988),
- les coordonnées de Talairach, obtenues en transformant les coordonnées qui sont fournies par SPM (figure 14),
- la valeur statistique (score Z),

du voxel pour lequel l'activation est maximale dans le cluster. Les clusters sont ordonnés par valeur statistique décroissante. Ainsi, les résultats seront décrits avec le maximum de « points de vue ». Les labels macro-anatomiques seront donnés en anglais, tels qu'ils sont nommés sur l'atlas de Duvernoy.

Figure 15.



Conventions de lecture du glass brain

Le glass brain représente l'espace du template utilisé pour normaliser les données. Il est un bon moyen de visualiser la disposition anatomique des activations dans les trois dimensions. A l'intérieur de cet espace, les activations sont représentées sous forme de tâches grisées qui sont vues en transparence sous trois points de vue (vue de côté, vue d'en haut, vue d'arrière).

H = haut

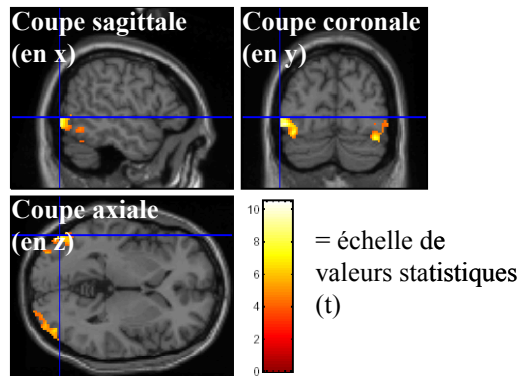
Av = avant ; Ar = arrière

G = gauche ; D = droite

● Exemple d'activation dans le lobe occipital gauche

Exemple de représentation des activations sur des coupes anatomiques dans les trois dimensions

Cerveau canonique de SPM.



2. Résultats

a. Analyse de groupe

Les cartes statistiques d'activation pour la perception et l'écriture, chez les sujets droitiers, sont présentées en figure 16. Les tableaux 1 et 2 précisent les valeurs statistiques de ces effets, ainsi que leurs localisations anatomiques dans la situation de perception et la situation d'écriture respectivement. Pour l'écriture, seules les activations frontales et pariétales sont reportées dans le tableau, car ce sont ces deux régions qui sont connues pour être cruciales dans les aspects moteurs de l'écriture (voir Introduction). En effet, notre but n'était pas de

décrire l'ensemble du réseau cérébral impliqué dans l'écriture, mais seulement d'en localiser les composantes motrices. En outre, les résultats montrent qu'hormis quelques clusters situées dans des régions non-motrices (cortex cingulaire postérieur, cortex temporal et préfrontal droits) et spécifiquement activés pour l'écriture de lettres, le même réseau est globalement impliqué dans l'écriture de lettres et de pseudolettres. Nous nous focaliserons donc uniquement sur ces activations communes dans la suite de la présentation des résultats.

Figure 16. Représentation anatomique des activations obtenues en perception et en écriture

Les activations obtenues en **perception** sont représentées à gauche ; les activations obtenues en **écriture**, à droite. En haut, les régions activées à la fois par les lettres et les pseudolettres (masquage inclusif des contrastes lettres vs. contrôle et pseudolettres vs. contrôle), c'est à dire impliquées dans la perception / l'écriture de formes graphiques, indépendamment de leur familiarité. En bas, les régions activées sélectivement pour les lettres, c'est à dire impliquées dans les traitements spécifiques à la perception / l'écriture de lettres (contraste direct lettres vs. pseudolettres).

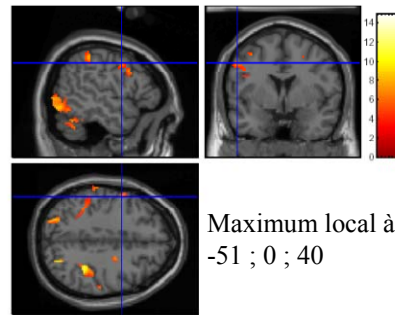
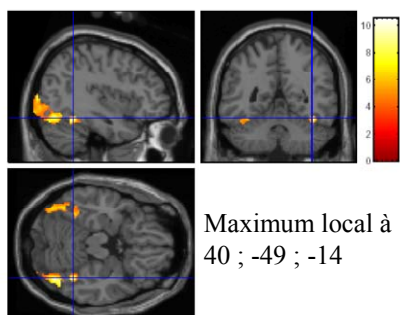
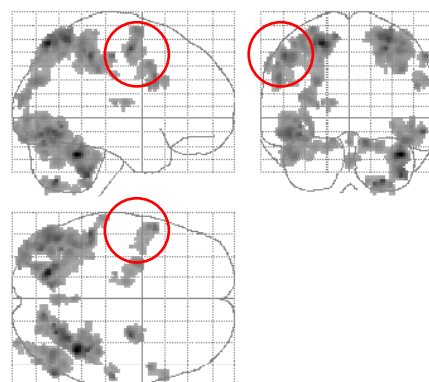
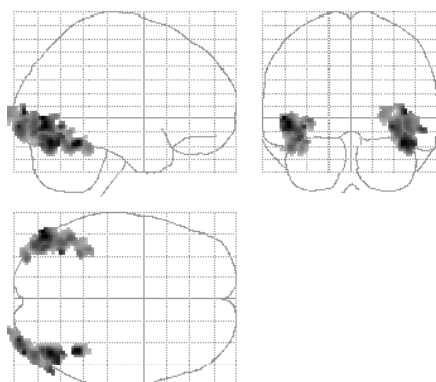
Pour chaque comparaison et condition, les cartes statistiques sont présentées sur le glass-brain (voir figure 5 pour les conventions de lecture) et sur des coupes anatomiques (cerveau canonique de SPM) dans les trois dimensions, centrées sur des maxima locaux dont les coordonnées sont reportées sur le côté.

L'activation précentrale gauche, spécifique aux lettres en perception, et commune aux lettres et aux pseudolettres en écriture, est entourée en rouge.

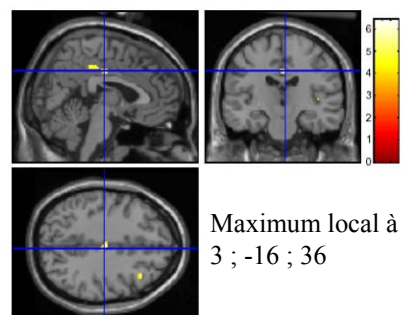
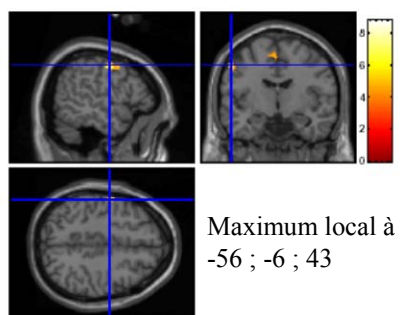
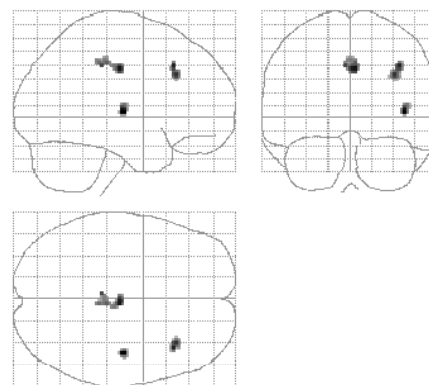
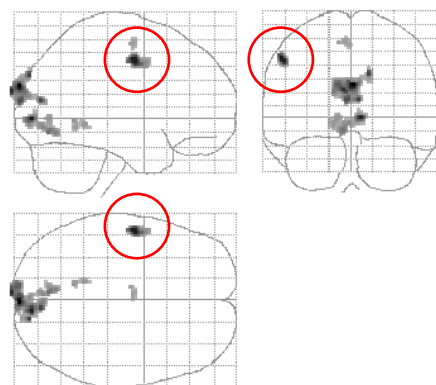
PERCEPTION

ECRITURE

Lettres & Pseudolettres



Lettres > Pseudolettres



La perception de lettres et de pseudolettres engageait uniquement des aires latérales des cortex occipital et occipito-temporal dans les deux hémisphères, avec un maximum dans le gyrus fusiforme droit. Les activations spécifiques à la perception de lettres se situaient dans des régions occipitales médiales, ainsi que dans deux parties de l'aire 6 de Brodmann, une partie médiale, correspondant à l'aire motrice supplémentaire (SMA), et une partie latérale, dans le gyrus précentral, correspondant au cortex prémoteur, et latéralisée à gauche (Picard & Strick, 2001).

Localisation anatomique	Coordonnées de Talairach			Score Z
	(mm)			
	x	y	z	
Régions activées spécifiquement par les Lettres				
Superior occipital gyrus (middle) BA 19	2	-92	29	4.56
Cuneus (middle) BA 19	8	-83	4	4.38
Precentral gyrus (left) BA 6	-53	6	43	4.37
Lingual gyrus (left) BA 19	-12	-52	1	3.49
Superior frontal gyrus (middle) BA 6	-10	-7	54	3.40
Régions activées communément par les Lettres et les Pseudolettres (maxima locaux et scores Z correspondant au contraste lettres vs. contrôle)				
Fusiform gyrus (right) BA 37	40	-49	-14	5.22
Inferior occipital gyrus (right) BA 18/19	32	-93	1	4.85
Middle occipital gyrus (left) BA 18/19/37	-40	-76	-8	4.81

Tableau 1. Activations dans la situation de perception

L'écriture engageait un ensemble de régions frontales ainsi que les lobules pariétaux supérieurs dans les deux hémisphères. L'activation frontale était plus forte à gauche, en revanche l'activation pariétale était plus marquée à droite.

A l'intérieur de ce réseau, on peut retrouver l'activation prémotrice latérale observée en perception de lettres, mais pas l'activation de la SMA. Cette activation prémotrice, commune à l'écriture et à la perception, est analysée plus précisément dans la figure 17. Cette figure montre que lorsque les stimuli étaient des lettres, l'activation était comparable en perception et en écriture. En revanche, cette région, qui n'était pas activée lorsque les sujets regardaient des pseudolettres, le devenait très largement lorsque ces mêmes pseudolettres étaient écrites. L'activation était même plus marquée en écriture de pseudolettres qu'en écriture de lettres. Ce

résultat est important car il est un bon indice de la réelle implication de cette région dans les mouvements graphiques.

Localisation anatomique	Coordonnées de Talairach (mm)			Score Z
	x	y	z	
Superior parietal gyrus (left) BA 7	-20	-67	57	5.50
Superior parietal gyrus (right) BA 7	30	-53	60	5.02
Superior frontal gyrus (right) BA 6	28	-5	50	4.92
Precentral gyrus (left) BA 6	-53	11	29	4.51
Superior frontal gyrus BA 6	-28	-1	65	4.28
Inferior frontal gyrus (right) BA 6/44	51	7	24	4.19

Tableau 2. Régions frontales et pariétales significativement activées dans la situation d'écriture

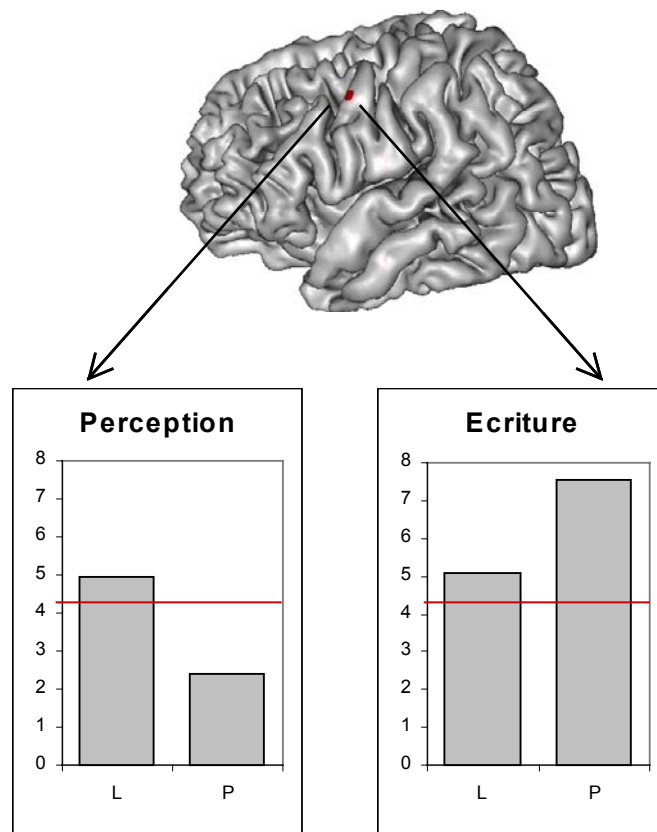


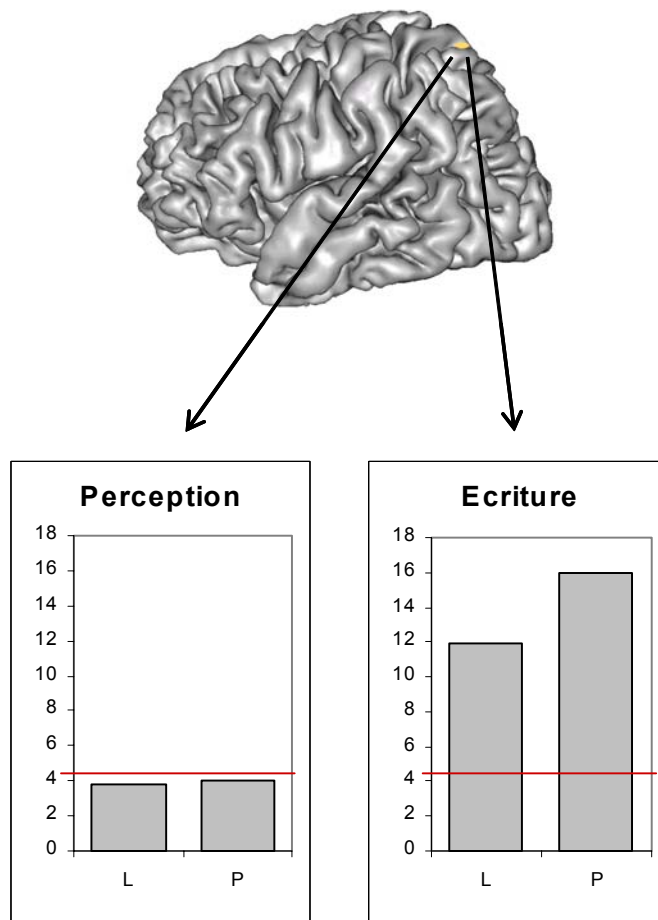
Figure 17. Comparaison des activations obtenues dans le gyrus précentral en perception et en écriture, pour les lettres et les pseudolettres

En haut, vue tridimensionnelle reconstruite à partir de l'anatomie d'un sujet montrant en rouge la région communément activée en perception et en écriture.

(logiciel BrainVisa, <http://www.madic.org/download/index.php#brainvisa>)

En bas, graphiques représentant les valeurs statistiques (t) obtenues sur le signal moyen dans cette région en fonction du type de stimulus (lettres ou pseudolettres, comparées au stimulus de contrôle). La ligne rouge représente la valeur de t à atteindre pour dépasser le seuil de 0.001 ($t = 4.14$). On voit que lorsque les sujets observent simplement les stimuli, l'activation pour les pseudolettres n'est pas significative. Elle le devient largement lorsque les sujets écrivent.

Les résultats n'incluent aucune activation pariétale gauche en perception de lettres, comme on aurait pourtant pu s'y attendre au regard d'autres résultats expérimentaux rapportés dans des tâches de perception d'objets manipulables (Chao & Martin, 2000; Gerlach et al., 2002; Kellenbach et al., 2003; Mecklinger et al., 2002). Afin de vérifier ce point, nous avons comparé les effets autour du point du lobule pariétal gauche où l'activation était maximale en écriture (figure 18). Cette analyse montre que les activations, très significatives en écriture, sont juste en dessous du seuil statistique en perception, à la fois pour les lettres et pour les pseudolettres.



Comparaison des activations obtenues dans le gyrus pariétal supérieur en perception et en écriture, pour les lettres et les pseudolettres

En haut, vue tridimensionnelle reconstruite à partir de l'anatomie d'un sujet montrant en jaune la région pariétale activée en écriture (logiciel BrainVisa).

En bas, graphiques représentant les valeurs statistiques (t) obtenues sur le signal moyen dans cette région en fonction du type de stimulus (lettres ou pseudolettres, comparées au stimulus de contrôle). La ligne rouge représente la valeur de t à atteindre pour dépasser le seuil de 0.001 ($t = 4.14$).

b. Analyse en régions d'intérêt

Afin de confirmer que les effets obtenus dans le cortex prémoteur étaient bien de même nature chez tous les sujets, et que l'activation observée en perception était bien reliée à des processus d'écriture, nous avons analysé les résultats individuels en adoptant une approche en région d'intérêt (ROI). Ces analyses ont été réalisées avec la boîte à outils MarsBar (Brett et al., 2002a). Pour chaque sujet, nous avons spécifié une région d'intérêt sur la base des résultats en écriture. Nous avons ensuite testé statistiquement si cette région était activée en perception de lettres. Pratiquement, nous avons extrait, sur la base des données fonctionnelles individuelles

non-normalisées le pic d'activation dans le cortex prémoteur gauche en écriture. La ROI a été définie comme un cube de 9 mm de côté centré sur ce pic. Nous avons ensuite réalisé un test t sur le signal moyen en perception de lettres, dans cette ROI. Les résultats sont présentés sur la figure 19. Parce que nous n'avons réalisé qu'une seule comparaison, nous avons fixé le seuil à $p < 0.05$. La ROI était significativement activée en perception chez la majorité des sujets (9 sur 11).

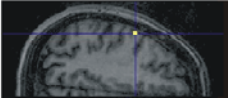
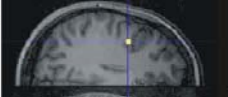
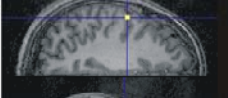
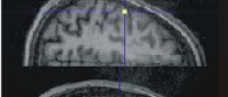
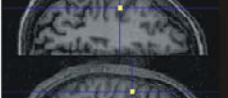


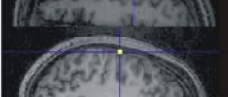
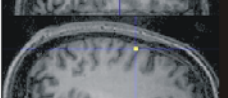
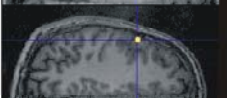

	ROI localisation	t-value	p
1		4.64	$< 0.0001^{**}$
2		3.97	$< 0.0001^{**}$
3		1.13	0.130
4		2.88	0.002*
5		5.97	$< 0.0001^{**}$
6		3.66	$< 0.0001^{**}$
7		4.45	$< 0.0001^{**}$
8		4.50	$< 0.0001^{**}$
9		2.21	0.014*
10		2.00	0.023*
11		0.98	0.16

Figure 19. Résultats de l'analyse en régions d'intérêt

Pour chaque sujet, de 1 à 11, la première colonne montre la localisation du pic d'activation dans le cortex prémoteur gauche pendant l'écriture, utilisé pour définir anatomiquement la ROI. Les deux autres colonnes montrent les résultats du test statistique opéré sur le signal moyen, en perception de lettres.

3. Discussion

Les résultats de cette expérience constituent une réponse positive à notre question de départ : la perception visuelle de lettres génère effectivement des activations dans des régions cérébrales traditionnellement qualifiées de motrices, le cortex prémoteur latéral et la SMA. Ces activations n'apparaissent pas lorsque les sujets observent des formes graphiques qui leur sont inconnues. Seule celle du cortex prémoteur est commune avec le réseau sous-tendant les mouvements graphiques. Nous allons, dans un premier temps, limiter la discussion à ces deux effets.

a. Cortex prémoteur latéral

Les régions prémotrices latérales, sous l'influence des aires pariétales, sont directement connectées au cortex moteur primaire et à la moelle épinière (Picard & Strick, 2001; Rizzolatti & Luppino, 2001). Ces connexions anatomiques témoignent d'un rôle prépondérant dans l'organisation du mouvement. Plusieurs interprétations peuvent être avancées pour expliquer l'effet observé, dans une situation où aucun mouvement n'est exécuté. Nous allons tenter de montrer que l'interprétation en termes de mouvements graphiques implicites est la plus adéquate, après avoir évoqué les autres hypothèses possibles.

Cortex prémoteur et mouvements des yeux

Une première possibilité, qui vient à l'esprit de beaucoup, est que les sujets déplaçaient leurs yeux pour parcourir visuellement les stimuli. En effet, le cortex prémoteur de l'homme contient une région spécialisée dans la programmation des mouvements des yeux (champs oculaires frontaux, Paus, 1996). Les mouvements des yeux n'ont pas été enregistrés, mais l'on peut raisonnablement exclure l'hypothèse de saccades réellement exécutées. En effet, les stimuli avaient une très petite taille (moins de 1° du champ visuel) et étaient présentés au centre de l'écran. Ils ne requéraient pas de saccades pour être explorés. En outre, les sujets avaient pour consigne de maintenir leur regard toujours fixé sur le centre de l'écran, où se trouvait soit un stimulus, soit une croix de fixation. En revanche, même s'il n'y a pas eu de réels mouvements des yeux, il est possible que le simple fait de faire attention aux stimuli ait pu générer des activations dans les champs oculaires frontaux. La « théorie prémotrice de

l'attention » énoncée par Rizzolatti et al en 1987 postule en effet que l'orientation de l'attention dans le champ visuel repose sur les mêmes mécanismes que la programmation des mouvements des yeux. Cette hypothèse était appuyée par une expérience de temps de réaction simple, dans laquelle les sujets devaient faire attention à un point de leur champ visuel périphérique (indice) puis répondre à l'apparition d'un stimulus cible qui pouvait apparaître à ce point ou pas. Lorsque la cible apparaissait dans une position non attendue, la réponse était ralentie et le coût temporel induit augmentait avec la distance entre l'indice et la cible. Cet allongement du temps de réaction a été expliqué comme le temps nécessaire à modifier le programme initialement créé pour amener les yeux dans la position attendue, afin de l'adapter à la position réelle de la cible. La théorie prémotrice de l'attention est largement étayée par des arguments neurophysiologiques. La lésion de l'aire 8 (champ oculaire frontal) chez le singe induit une diminution des mouvements de l'œil controlatéral, mais surtout une négligence de l'hémi-espace controlatéral (Rizzolatti et al., 1983). Au contraire, la microstimulation électrique des champs oculaires frontaux, en dessous du seuil nécessaire pour provoquer des saccades, renforce les réponses à des stimulations visuelles dans l'aire visuelle V4 (Moore & Armstrong, 2003). Ainsi, de l'activité des aires oculomotrices dépendrait en partie la focalisation de l'attention visuelle sur un point de l'espace, et donc le gain qu'elle induit au niveau des aires visuelles associatives. Des effets comparables ont été obtenus chez l'homme : la stimulation magnétique transcrânienne des champs oculaires frontaux facilite la détection visuelle de cibles dans l'espace (Grosbras & Paus, 2002). En neuroimagerie, de nombreuses études ont montré que les champs oculaires frontaux sont systématiquement impliqués dans l'orientation implicite de l'attention visuelle, conjointement avec le sillon intrapariétal (Boussaoud, 2001; Corbetta & Shulman, 2002; Gitelman et al., 1999; Nobre et al., 1997; Pollmann & von Cramon, 2000). Il est donc désormais bien établi que les déplacements de l'attention visuospatiale sont en quelque sorte des mouvements naissants des yeux. Ils reposent sur l'activité d'un réseau neural pariéto-frontal sous-tendant les mouvements oculaires. Dans le cadre de la présente étude, cette interprétation peut être néanmoins écartée pour deux raisons : la première raison est que les activations prémotrices liées à l'attention visuospatiale, et rapportées dans les études citées sont toujours bilatérales et même plus marquées du côté droit chez des droitiers. Or dans notre étude l'activation était latéralisée exclusivement à gauche. La seconde raison a trait à la différence d'effets observée entre les stimuli lettres et pseudolettres, qui possédaient pourtant les mêmes propriétés physiques globales, et n'avaient donc pas de raison d'être traités différemment sur le plan de l'attention spatiale. Au contraire, les pseudolettres, en tant que stimuli nouveaux, auraient dû

focaliser davantage l'attention spatiale, et donc activer vPMsup plus fortement, ce qui n'est pas le cas.

Cortex prémoteur et articulation subvocale

La seconde interprétation possible est de nature verbale. Il se peut en effet que les sujets aient prononcé mentalement le nom des lettres présentées. Certaines aires motrices associatives (les « aires motrices de la parole ») ont été impliquées dans les phénomènes d'articulation subvocale, en particulier dans la lecture silencieuse (Price et al., 1996), et dans des tâches de mémoire de travail verbale (Paulesu et al., 1993; Smith & Jonides, 1999). Cette interprétation paraît cependant peu probable, car nous n'avons pas observé d'activation de l'aire de Broca (aire 44 de Brodmann), dont l'implication dans les traitements phonologiques (Fiez & Petersen, 1998; Price et al., 1996), ainsi que dans les processus d'articulation subvocale (Dogil et al., 2002; Paulesu et al., 1993; Smith & Jonides, 1999) est généralement admise. En outre, l'activation du cortex prémoteur que nous décrivons est située beaucoup plus dorsalement et latéralement que les centres moteurs articulatoires présumés, mis en évidence par l'étude de patients apraxiques pour la parole (Dronkers, 1996), et en neuroimagerie (Dogil et al., 2002; Fiez & Petersen, 1998). Ces arguments théoriques sont de plus étayés par un argument important dans nos résultats : en situation d'écriture, le cortex prémoteur était plus activé par les pseudolettres, qui sont des formes non verbalisables, que par les lettres.

Cortex prémoteur et écriture

En dehors des mouvements des yeux ou des articulateurs, le cortex prémoteur a fréquemment été impliqué dans la programmation et le contrôle des mouvements de la main (Fink et al., 1997; Jeannerod, 1994; Jeannerod et al., 1995; Kakei et al., 2001; Rizzolatti & Luppino, 2001). Par les deux approches statistiques que nous avons adoptées (étude de groupe et étude en région d'intérêt), nous avons pu montrer que la région prémotrice activée durant la perception de lettres faisait partie du réseau plus large codant pour les mouvements d'écriture (figures 17 et 19). La manière dont cette zone semble traiter les pseudolettres est particulièrement intéressante : lorsque ces dernières sont simplement vues, il n'y a pas d'augmentation du débit sanguin. Par contre, lorsqu'elles sont écrites, la réponse devient largement significative. Ceci confirme le rôle de la région prémotrice observée en perception dans les mouvements graphiques, que ce soit pour l'écriture de stimuli surappris comme les lettres, ou pour la programmation de la séquence de mouvements nécessaire à reproduire des formes graphiques nouvelles.

En fait, le cortex prémoteur latéral est, avec le cortex pariétal, désigné comme l'une des structures cérébrales les plus cruciales pour la programmation des mouvements d'écriture (Anderson et al., 1993; Katanoda et al., 2001; Menon & Desmond, 2001; Roeltgen, 1985; Seitz et al., 1997; Siebner et al., 2002). Des lésions prémotrices très circonscrites peuvent causer des agraphies apraxiques, qui sont des troubles moteurs spécifiques à l'écriture (Aimard et al., 1975; Anderson et al., 1990; Exner, 1881; Gordinier, 1899; Hodges, 1991; Ohno et al., 2000; Sakurai et al., 1997). L'existence de ces cas a conduit certains auteurs, dont le premier a été Exner (1881), à faire l'hypothèse de l'existence d'un centre cérébral de l'écriture, au pied de la seconde circonvolution frontale gauche, au dessus de l'aire de Broca (voir Introduction). La figure 20 est tirée de l'article de Anderson et coll. (1990). Elle présente le site de la lésion de leur patiente. Rappelons que cette dernière présentait une agraphie apraxique très sévère, associée à des troubles de la reconnaissance visuelle des lettres et de la lecture. La similarité avec l'activation commune à la perception et à l'écriture de lettres en termes de localisation est frappante. Ainsi, cette région semble largement impliquée dans la mémoire des mouvements graphiques, et peut être leur apprentissage.

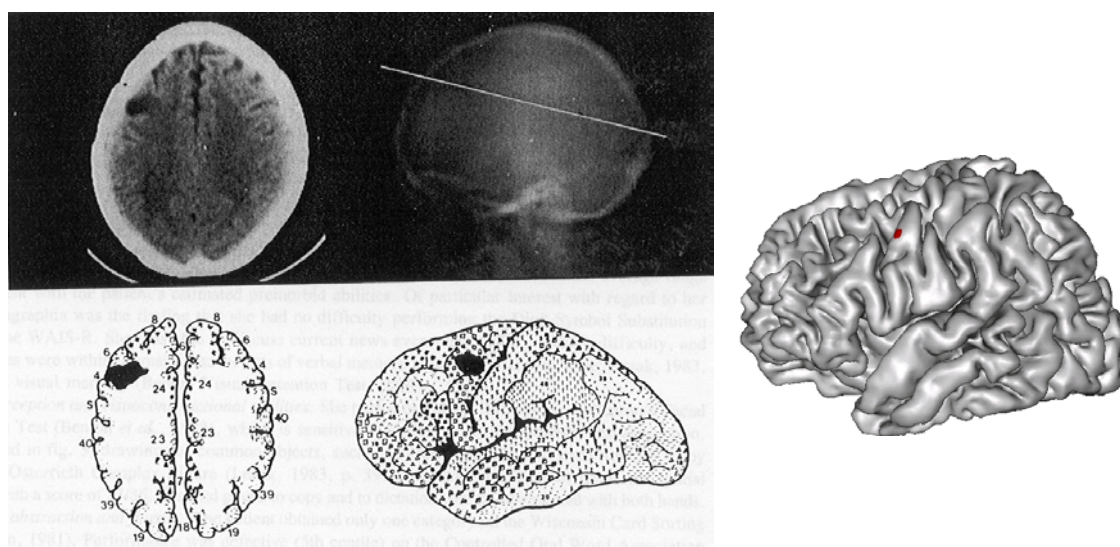


Figure 12. Représentation anatomique de la lésion de la patiente de Anderson et al. (1990), et de l'activation commune à la perception et l'écriture de lettres, dans notre expérience (à droite)

Dans la situation d'écriture réelle, le cortex prémoteur était activé bilatéralement, à la fois dans ses parties dorsale et ventrale. Ce résultat est surprenant, car l'agraphie apparaît le plus

souvent suite à une lésion de l'hémisphère controlatéral à la main préférentielle, ce qui laisserait penser que les processus moteurs de l'écriture sont gérés par ce seul hémisphère. Plusieurs études de neuroimagerie décrivent des activations unilatérales des cortex pariétal et prémoteur dans des tâches d'écriture (Katanoda et al., 2001; Menon & Desmond, 2001; Siebner et al., 2002). Nous pensons que ce résultat pourrait s'expliquer par la tâche de contrôle utilisée. En effet, dans ces études, la condition de mouvement était comparée à une condition de repos. Dans notre étude en revanche, la condition de contrôle impliquait aussi un mouvement graphique, et la comparaison montrait les aires qui étaient plus activées par un mouvement que par l'autre. Des résultats similaires ont été rapportés par Rjintjes et coll. (1999), lorsqu'ils comparaient l'action de signature avec des mouvements de zigzag. Il est possible que lorsque le mouvement est complexe (comme écrire une lettre ou une pseudolettre, par rapport à des hachures), le cortex prémoteur ipsilatéral soit recruté, tandis que lorsque le mouvement est très simple, ce dernier soit déactivé. Des études d'inactivation transitoire chez le primate montrent que l'aire F5 exerce une action bilatérale sur les mouvements de la main (Rizzolatti & Luppino, 2001).

b. Rôle de la SMA

La comparaison directe entre les lettres et les pseudolettres en perception a également révélé une activation dans la SMA du coté gauche. Cette région semble jouer un rôle important dans le contrôle du déclenchement d'une action ou d'une séquence d'actions (Picard & Strick, 2001; Rizzolatti & Luppino, 2001; Toma et al., 1999), et être plus fortement activée lorsque l'action est initiée sur la base d'une décision du sujet que sur la base d'un événement externe (Deiber et al., 1999; Thut et al., 2000). Pour Rizzolatti et Luppino (2001), la fonction principale de la SMA est de déterminer « quand bouger ». En montrant qu'elle est plus impliquée durant la relaxation volontaire que durant la contraction volontaire, Toma et coll. (1999) ont pointé son rôle dans l'inhibition motrice, et sans doute dans la délicate alternance d'activations et d'inhibitions nécessaires à la préparation et à la réalisation d'une séquence de mouvements. Dans le cadre de notre étude, la différence évidente entre la condition d'écriture et la condition de perception est que dans le premier cas, l'action devait être réellement exécutée, tandis que dans le second, et si nos hypothèses sont exactes, elle était évoquée sans devoir être exécutée. On peut ainsi envisager un rôle régulateur de la SMA sur le cortex prémoteur. D'autre part, des activations de la SMA ont souvent été décrites dans des tâches de

mémoire de travail verbale (Smith & Jonides, 1999), ou d'articulation (Dogil et al., 2002; Fiez & Petersen, 1998). Il est donc possible que l'activation de la SMA soit liée à la prononciation subvocale des lettres, même si, encore une fois, l'absence d'activation de l'aire de Broca décourage cette interprétation.

c. Conclusion

Ces résultats constituent une évidence forte d'interactions perceptivo-motrices au cours de la perception visuelle de lettres isolées. Etant donnée leur nouveauté, il nous a paru fondamental de les confirmer, en particulier pour écarter définitivement l'hypothèse « phonologique ». En effet, les lettres et les pseudolettres se distinguent par l'existence de programmes moteurs prédéterminés seulement pour les premières. Mais la différence majeure reste que seules les lettres sont des formes linguistiques, et donc potentiellement verbalisables.

La meilleure manière de vérifier ce point était de trouver un moyen de dissocier les traitements linguistiques des traitements moteurs liés à la main. C'est ce que nous avons fait en étudiant les activations cérébrales de sujets gauchers qui observaient des lettres et des pseudolettres, et en comparant les résultats avec ceux des droitiers.

Chez la majorité des gauchers, comme chez les droitiers, les traitements verbaux sont gérés par l'hémisphère gauche. En témoignent les études cliniques de patients aphasiques, qui montrent que les lésions gauches chez des gauchers conduisent dans beaucoup de cas au même type de troubles du langage que chez les droitiers (Hécaen & Sauguet, 1971). La fréquence de dominance droite pour le langage a récemment été mesurée précisément chez 326 sujets diversement latéralisés, dans une tâche de prononciation subvocale de mots, en utilisant la « sonographie Doppler transcrânienne », technique non invasive qui permet de mesurer le débit sanguin dans les artères cérébrales moyennes (Knecht et al., 2000). Les auteurs rapportent que l'incidence de dominance droite augmente avec la latéralité motrice gauche, de 4% pour les droitiers complets, à 15% pour les ambidextres et 27% chez les gauchers les plus fortement latéralisés (score de -100, c'est à dire utilisation exclusive de la main gauche). Ce résultat confirme que les aspects verbaux du langage sont sous-tendus par l'hémisphère gauche chez la majorité des individus, quelle que soit leur dominance manuelle.

En revanche, comme nous l'avons dit en introduction théorique, les représentations motrices de l'écriture sont stockées dans l'hémisphère commandant la main qui écrit, et surtout qui apprend à écrire, et ceci indépendamment des fonctions linguistiques (Siebner et al., 2001; Rijntjes et al., 1999; Herron et al., 1979). Chez les droitiers, elles sont latéralisées à gauche, et chez les gauchers, à droite. Par conséquent nous faisons l'hypothèse que dans des conditions expérimentales identiques aux précédentes, les activations prémotrices engendrées par la présentation visuelle de lettres devraient être localisées dans l'hémisphère droit chez des gauchers. Si nous avons trouvé une activation bilatérale ou à gauche, l'hypothèse linguistique aurait dû être privilégiée.

I.B. Comparaison des activations cérébrales de sujets gauchers et droitiers, au cours de la perception de lettres et de pseudolettres

Longcamp, M., Anton, J. L., Roth, M., & Velay, J. L. Premotor activations in response to visually presented single letters depend on the hand used to write: a study in left-handers, (soumis)

1. Méthodes

a. Sujets

Treize sujets gauchers adultes (9 hommes et 4 femmes, âge moyen : 27 ans +/- 5 ans) de langue maternelle française ont participé aux expériences. Le critère principal d'inclusion d'un sujet dans le groupe était l'utilisation exclusive de la main gauche pour les activités d'écriture et au cours de l'apprentissage de l'écrit. Cependant, pour préserver une certaine homogénéité dans le groupe, nous avons inclus uniquement des sujets qui réalisaient aussi la plupart des autres activités de la vie quotidienne de la main gauche. Ainsi, les scores de latéralité, évalués avec l'inventaire d'Edinburgh (Oldfield, 1971), étaient échelonnés entre -50 et -100, avec une moyenne de -78. Nous avons vérifié qu'aucun de ces sujets n'avait d'antécédents de dyslexie ou d'autres troubles neurologiques. Tous ont donné leur consentement informé. Le protocole a reçu l'accord du C.C.P.P.R.B. Marseille 1 sous le numéro 02010.

b. Design expérimental et traitement des données

Nous avons repris le protocole créé pour le groupe de droitiers, mais uniquement la partie « perception » (3 sessions d'acquisition). L'acquisition et le traitement des données étaient absolument identiques (se reporter à la section I-1).

2. Résultats

Les cartes statistiques d'activation pour la perception de lettres et de pseudolettres, chez les sujets gauchers, sont présentées en figure 21, parallèlement aux cartes qui avaient été

obtenues en perception chez les droitiers. Le tableau 3 précise les valeurs statistiques des effets obtenus, ainsi que leurs localisations anatomiques. Le résultat principal est que l'on observe chez les gauchers une activation dans le gyrus précentral, spécifiquement pour la perception de lettres, et cette fois latéralisée à droite. Cette activation était symétrique à celle observée chez les droitiers dans la même situation, comme le souligne la figure 22. Les autres aires activées chez les gauchers dans la comparaison entre les lettres et les pseudolettres étaient différentes des aires activées chez les droitiers. Il s'agit de régions pariétales, d'une région frontale inférieure, et d'une région temporale. Toutes les activations étaient latéralisées à droite.

Chez les gauchers, les aires activées à la fois pour les lettres et les pseudolettres étaient plus nombreuses et distribuées que chez les droitiers, comme si le traitement visuel de formes graphiques en général engageait chez ces sujets des processus qualitativement ou quantitativement différents. Les zones occipitales et occipito-temporales bilatérales étaient activées, comme chez les droitiers, avec cette fois un maximum dans le gyrus fusiforme gauche. En plus de ces activations, des effets significatifs apparaissaient dans le cortex pariétal supérieur et surtout dans l'aire 6 bilatérale. Cette dernière activation était plus ventrale et moins latérale que celle observée spécifiquement pour les lettres, comme le montrent les coupes anatomiques de la figure 21.

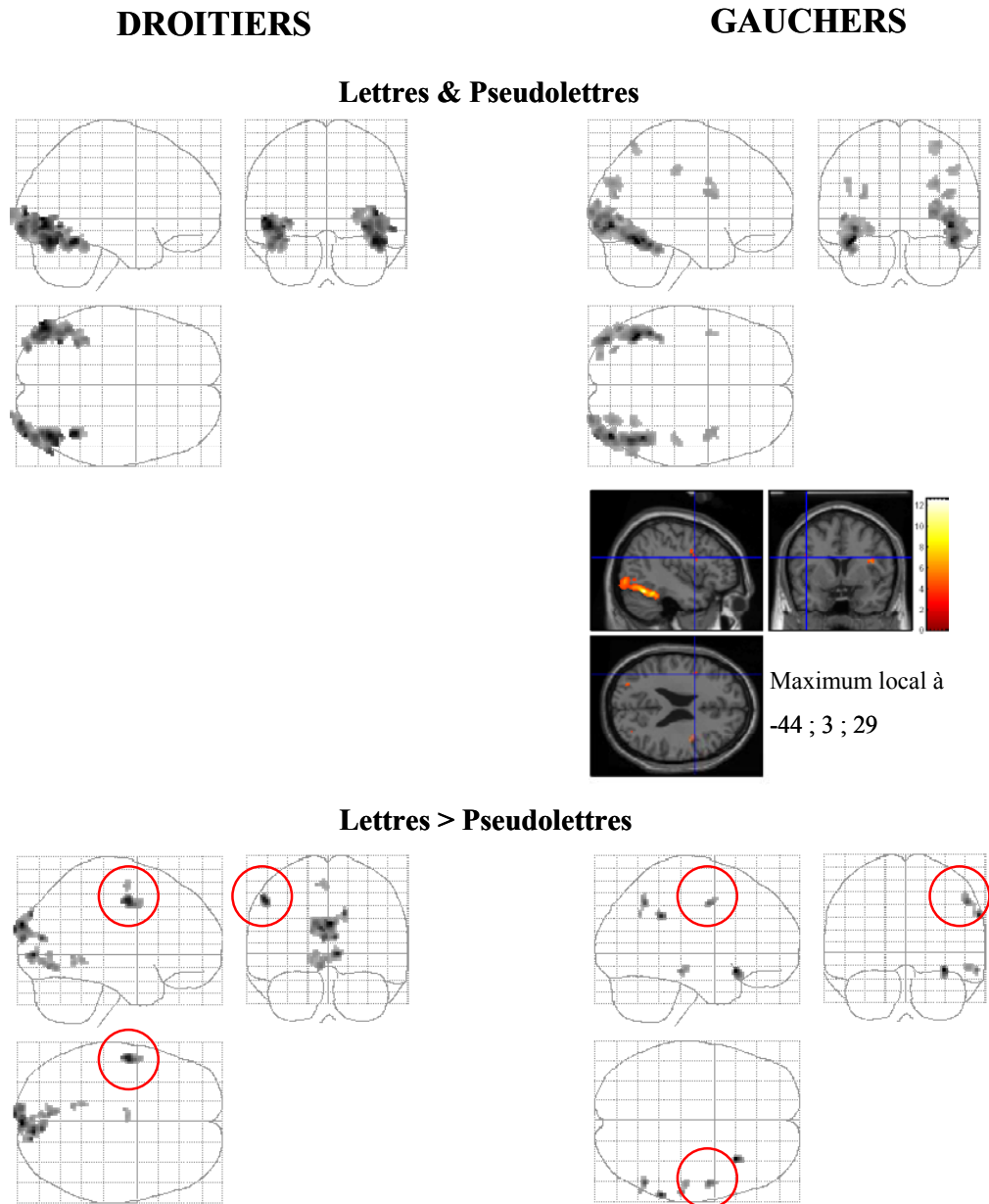


Figure 21. Représentation anatomique des activations obtenues chez les droitiers et les gauchers

Les activations obtenues chez les **droitiers** sont représentées à gauche ; les activations obtenues chez les **gauchers**, à droite. En haut, les régions activées à la fois par les lettres et les pseudolettres (masquage inclusif des contrastes lettres vs. contrôle et pseudolettres vs. Contrôle), c'est à dire impliquées dans la perception de formes graphiques, indépendamment de leur familiarité. En bas, les régions activées sélectivement pour les lettres, c'est à dire impliquées dans les traitements spécifiques à la perception de lettres (contraste direct lettres vs. pseudolettres).

Pour chaque comparaison et condition, les cartes statistiques sont présentées sur le glass-brain (voir figure5 pour les conventions de lecture). Des coupes anatomiques (cerveau canonique de SPM) dans les trois dimensions, montrent l'activation bilatérale du gyrus frontal inférieur pour les lettres et les pseudolettres chez les gauchers. Cette activation n'existe pas dans les mêmes conditions chez les droitiers.

L'activation précentrale, spécifique aux lettres en perception, est entourée en rouge.

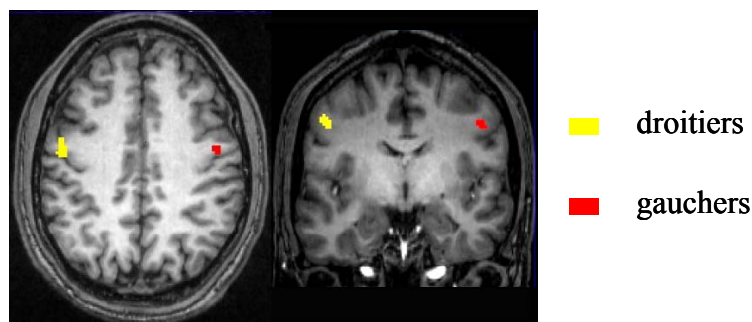


Figure 22. Symétrie des activations précentrales chez les droitiers et les gauchers, en perception de lettres

Coupes axiale et coronale montrant l'activation obtenue chez les droitiers (en jaune) et chez les gauchers (en rouge).

Localisation anatomique	Coordonnées de Talairach (mm)			Score Z
	x	y	z	
Régions activées spécifiquement par les Lettres				
Posterior orbital gyrus (right) BA 47	32	17	-13	4.94
Supramarginal gyrus (right) BA 40	61	-41	32	4.62
Angular gyrus (right) BA 40	51	-51	41	4.29
Precentral gyrus (right) BA 6	51	-2	39	4.11
Middle temporal gyrus (right) BA 21	59	-28	-10	4.02
Régions activées communément par les Lettres et les Pseudolettres (maxima locaux et scores Z correspondant au contraste lettres vs. contrôle)				
Fusiform gyrus (left) BA 37/19	-40	-60	-12	5.55
Middle occipital gyrus (right) BA 18/19/37	42	-80	-1	5.44
Superior occipital gyrus (right) BA 19	30	-76	31	4.06
Middle occipital gyrus (left) BA 19	-30	-75	22	3.91
Inferior frontal gyrus (right) BA 6	40	7	16	3.89
Superior parietal gyrus (right) BA 7	32	-57	60	3.83
Supramarginal gyrus (right) BA1/2	44	-23	38	3.63
Precentral gyrus (left) BA6	-44	3	29	3.60

Tableau 3. Activations dans la situation de perception, chez les sujets gauchers

3. Discussion

L'implication de régions cérébrales motrices dans la perception de lettres chez les gauchers et les droitiers peut être résumée en trois points principaux, qui nous paraissent importants à discuter :

- Le premier, qui est le plus important, est l'activation de la partie latérale de l'aire 6 de Brodmann (cortex prémoteur) durant la perception visuelle de lettres, exclusivement dans l'hémisphère gauche chez les droitiers et exclusivement dans le droit chez les gauchers. Cette activation sera désignée sous le sigle **vPMsup** (cortex prémoteur ventral supérieur).
- Le second, l'activation de régions prémotrices plus ventrales et bilatérales chez les gauchers, commune à la perception de lettres et de pseudolettres. Cette activation sera désignée sous le sigle **vPMinf** (cortex prémoteur ventral inférieur).
- Enfin, le troisième, l'implication du cortex pariétal dans les deux groupes, qui n'apparaît pas spécifique à la perception de lettres.

Nous terminerons en discutant brièvement des activations non-motrices, liées au traitement visuel des stimuli, et des différences entre gauchers et droitiers dans ce cadre.

a. vPMsup : une aire graphomotrice

Les résultats des gauchers nous montrent que l'activation prémotrice déclenchée sélectivement par la perception de lettres est effectivement localisée dans l'hémisphère droit. Ce résultat marque l'influence de « la main qui écrit » sur la configuration des activations obtenues en perception, confirmant ainsi la nature graphomotrice de vPMsup, et écartant définitivement l'interprétation linguistique. Le maximum local de l'activation observée était tout à fait symétrique à celui des droitiers (coordonnées de Talairach des gauchers : 51 ; -2 ; 39, et des droitiers : -53 ; 6 ; 43), ce qui est un bon indice de l'équivalence fonctionnelle des deux zones.

L'examen des « glass brains » de la figure 21 montre toutefois que l'activation de vPMsup est moins étendue spatialement chez les gauchers que chez les droitiers. La variabilité inter-individuelle dans la distribution des fonctions cérébrales, qui est plus importante chez les gauchers, pourrait être une explication (Hécaen & Sauguet, 1971). D'autre part, certaines

études neuroanatomiques ont décrit des différences d'anatomie macroscopique entre les gauchers et les droitiers, en particulier une absence d'asymétrie dans la forme des sillons central (Amunts et al., 2000) et précentral (Mangin et al., 2003) chez les gauchers, et également moins d'asymétrie ou plus de variabilité dans le volume de matière gris dans les deux hémisphères (Watkins et al., 2001). Cette variabilité aurait pu avoir deux conséquences : d'abord, les cerveaux des gauchers auraient pu être moins bien traités au cours de la procédure de normalisation, car le « template » que nous avons utilisé pour normaliser les données fonctionnelles est probablement composé en majorité de cerveaux de droitiers moyennés ; ensuite, même si la normalisation anatomique avait fonctionné correctement, la variabilité aurait pu conduire à une superposition moins précise des zones fonctionnellement équivalentes.

b. vPMInf : un effet aspécifique

Chez les gauchers, une portion ventrale de l'aire 6 (vPMInf) était activée à la fois par les lettres et les pseudolettres. Cela constitue une différence notable entre les deux groupes de sujets. Alors que chez les droitiers, les seules régions significativement activées étaient des aires du cortex visuel extrastrié, tout se passe comme si les gauchers avaient mis en jeu des traitements de nature motrice dans les mêmes conditions. Comme nous l'avons noté précédemment, il a été démontré que certains neurones du cortex prémoteur ventral possèdent des propriétés visuelles, et sont notamment impliqués dans la reconnaissance visuelle d'objets (Murata et al., 1997). Chez l'homme, plusieurs études récentes ont mis en évidence son implication, conjointement à celle du sillon intrapariétal, dans l'observation, la dénomination, le maintien en mémoire d'objets potentiellement manipulables (Chao & Martin, 2000; Gerlach et al., 2002; Grèzes et al., 2003; Kellenbach et al., 2003; Mecklinger et al., 2002), ainsi que dans des processus attentionnels dirigés vers ce type d'objets (Handy et al., 2003). Les formes graphiques peuvent difficilement être assimilées à des objets saisissables ou manipulables. En fait, certaines des études citées ci-dessus montrent que le réseau de préhension activé répond pour tous les artéfacts, c'est à dire les objets non-naturels, indépendamment du fait qu'ils soient ou pas spécifiquement manipulables (Gerlach et al., 2002; Kellenbach et al., 2003). D'autre part, des études qui impliquaient une analyse visuospatiale de formes géométriques bi- ou tridimensionnelles signalent aussi des activations dans des zones très proches (Richter et al., 2000; Lamm et al., 2001; Schubotz & von

Cramon, 2002). Les coordonnées des activations de vPMInf observées chez les gauchers se rapprochent de celles décrites dans ces différentes études, comme le montre le tableau 4. L'attribut commun aux stimuli utilisés dans l'ensemble de ces expériences est leur conformation spatiale, attribut qui pourrait expliquer en partie les activations pariéto-frontales rapportées. Une analyse visuospatiale précise était nécessaire dans notre étude pour distinguer les lettres et les pseudolettres, car les pseudolettres étaient formées de parties de lettres réelles. Il est donc possible que l'activation de vPMInf soit reliée au traitement spatial des formes graphiques. Il est plus difficile d'expliquer pourquoi un tel effet n'apparaît pas dans le groupe de droitiers. En fait, il pourrait s'agir d'une différence quantitative plutôt que qualitative. Une exploration rétrospective des données individuelles montre que certains sujets droitiers (6 sur 11 d'après l'observation des données individuelles seuillées à $p < 0.001$ non corrigé) présentent le même type d'activation du vPMInf bilatéral que les gauchers.

étude	tâches	coordonnées vPMCinf
Chao and Martin, 2000	viewing tools / animals	-42 ; 6 ; 23
	naming tools / animals	-50 ; 3 ; 25
Mecklinger et al, 2002	images of manipulable objects held in working memory	-46 ; 5 ; 31
Kellenbach et al, 2003	judgments of function of manipulable vs nonmanipulable artefacts	-54 ; 10 ; 28
	judgments of action associated with manipulable vs function of nonmanipulable artefacts	-50 ; -2 ; 26
Gerlach et al, 2002	artefact (man made objects) / natural object categorisation	-66 ; 6 ; 22
Grèzes et al, 2003	viewing graspable object / baseline	-44 ; 2 ; 30
Schubotz and von Cramon, 2002	predicting the size of a circle in an ordered sequence / color judgment	-51 ; 3 ; 21 (Left) 48 ; 8 ; 23 (Right)
Richter et al, 2000	mental rotation of artificial 3D objects	not reported
Lamm et al, 2001	visuospatial mental imagery / fixation	-48 ; 4 ; 28 (Left) 56 ; 4 ; 28 (Right)
MOYENNE		-50.1 ; 4.1 ; 26.0 (Left) 52 ; 6 ; 25.5
Present study	viewing letters and pseudoletters / control	40 ; 7 ; 16 (Right) -44 ; 3 ; 29 (Left)

Tableau 4: Comparaison des coordonnées du cortex prémoteur ventral rapportées dans des études sur le traitement visuel d'objets manipulables ou de formes géométriques, et dans la présente étude, pour la perception de lettres et de pseudolettres, chez les gauchers

c. Cortex pariétal, écriture et perception

Nous avons déjà mentionné à plusieurs reprises le rôle important du cortex pariétal dans l'écriture (Menon & Desmond, 2001). Les données obtenues en écriture chez les droitiers montrent en effet que les activations pariétales sont parmi les plus marquées. Nous aurions donc pu imaginer que cette structure serait activée au cours de la perception de lettres. Les résultats de groupe montrent que ce n'est pas exactement le cas. En fait, l'activation du cortex pariétal supérieur en perception ne se différencie pas pour les lettres et les pseudolettres. Chez les gauchers, elle est significative dans l'hémisphère droit, et chez les droitiers, elle reste à l'état de tendance, juste sous le seuil statistique, dans l'hémisphère gauche. Cela signifie que l'analyse visuelle d'une forme graphique implique des traitements dans le cortex pariétal, quelle que soit cette forme. Des activations de cette région du cortex pariétal sont systématiquement décrites en parallèle des activations prémotrices dans la perception visuelle d'objets manipulables (Chao & Martin, 2000; Gerlach et al., 2002; Grèzes et al., 2003; Kellenbach et al., 2003; Mecklinger et al., 2002). Nos données suggèrent donc une implication du cortex pariétal supérieur dans une analyse aspécifique des stimuli graphiques, sans doute de nature visuospatiale et en rapport avec les activations du vPMInf. Elles pourraient concorder avec des données électrophysiologiques de Sereno et Maunsell (1998), qui montrent une sélectivité à la forme de symboles graphiques bidimensionnels dans le cortex intrapariétal latéral du primate, pendant une tâche de fixation passive ou d'appariement différé. Cependant, les relations entre perception et écriture de caractères mériteraient sans doute une exploration plus fine dans le cortex pariétal. Différentes sub-divisions des régions pariétales des deux hémisphères semblent impliquées dans diverses caractéristiques du contrôle des mouvements d'écriture (Seitz et al., 1997). Il est clair que le cortex pariétal est plus généralement une aire d'intégration multimodale, sans doute impliquée dans de nombreux aspects du mouvement, en relation avec des événements sensoriels (Andersen et al., 1997; Fagg & Arbib, 1998; Jeannerod et al., 1995; Taira et al., 1990). Il semble en outre jouer un rôle crucial dans la conscience de l'action et l'attribution d'une action à soi ou à autrui (Blakemore & Frith, 2003; Sirigu et al., 1999).

d. Des stratégies différentes en perception, chez les gauchers et les droitiers ?

Il est frappant de constater que, sauf l'activation de vPMsup qui est remarquablement symétrique chez les gauchers et les droitiers, il n'y a pas de régions dont l'activation est comparable dans les deux groupes en perception de lettres. Ce résultat est assez difficile à interpréter car d'une part, l'ensemble des aires corticales impliquées dans le traitement visuel de lettres est mal défini, et d'autre part, l'organisation cérébrale des gauchers est variable (Hécaen & Sauguet, 1971), et elle aussi très mal connue. Il se pourrait que les deux groupes utilisent des stratégies différentes, comme le suggèrent certaines études comportementales (Benoit-Dubrocard & Touche, 1993; Cohen, 1972). Chez les droitiers, on note l'activation d'aires occipitales médiales, aires activées dans les premières études en TEP sur la lecture (Petersen et al., 1990), et supposées cruciales pour le traitement visuel des mots. Plus récemment, il a été montré que ces régions sont plus activées dans l'analyse visuelle de la configuration globale d'un stimulus, que dans l'analyse de ses attributs locaux (Fink et al., 1996). Elles sont activées lors de tâches d'imagerie visuelle de lettres (Raij, 1999), et sous-activées chez des sujets dyslexiques qui lisent des mots (Brunswick et al., 1999). Chez les gauchers, on observe des activations des gyri angulaire et supramarginal, structures connues pour être impliquées dans les traitements linguistiques en lecture depuis Déjerine (1892). Leur lésion peut provoquer des alexies (Déjerine, 1892; Montant & Behrmann, 2000) ou des agraphies d'origine linguistique (phonologiques ou lexicales, Anderson et al., 1993; Roeltgen, 1985). Elles sont parfois activées au cours de tâches de lecture (Mechelli et al., 2003; Price et al., 1996). Dans aucun des deux groupes on ne trouve de région du cortex occipital latéral qui réponde spécifiquement aux lettres, comme il a pourtant été suggéré par plusieurs auteurs (Cohen et al., 2000; Kuriki et al., 1996; Polk & Farah, 1998; Polk et al., 2003; Tarkiainen et al., 1999). Au contraire, le gyrus fusiforme ipsilatéral à la main dominante est très fortement activé en perception, mais à la fois pour les pseudolettres et pour les lettres. Cette région est connue pour être cruciale dans l'analyse de la forme visuelle des objets (Kourtzi & Kanwisher, 2001).

II. Synthèse

Ainsi, lorsque nous voyons des lettres, une zone de notre cerveau codant les mouvements d'écriture se met en activité. Ce résultat constitue une avancée majeure dans notre problématique de départ. Toutefois, il ne nous renseigne pas directement sur les implications fonctionnelles du phénomène. Les interactions perceptivo-motrices, mises en évidence au niveau neural, participent-elles effectivement à la reconnaissance des caractères ?

Cependant, un certain nombre d'arguments expérimentaux et cliniques conduisent à penser que représentation motrice et visuelle des lettres sont fonctionnellement étroitement associées. L'impossibilité à reconnaître les lettres couplée à une agraphie consécutive à une lésion cérébrale prémotrice (Anderson et al., 1990) en est la démonstration la plus manifeste. Inversement, lorsqu'une lésion cérébrale perturbe la reconnaissance visuelle de lettres, la main, en traçant leur forme, peut apporter à la vision une aide très efficace (Bartolomeo et al., 2002; Mycroft et al., 2002; Seki et al., 1995). Cet apport sensorimoteur à la reconnaissance visuelle est semble-t-il très utilisée dans le cas des systèmes idéographiques. Lorsque un japonais rencontre, parmi les centaines de caractères qu'il lit et écrit, un caractère particulier dont il a oublié le sens, il amorce la reconnaissance en le traçant dans l'air. Il existe ainsi quelques indices qui suggèrent que la reconnaissance visuelle de caractères pourrait être facilitée par la connaissance des mouvements graphiques. Mais dans un cas, les effets comportementaux sont consécutifs à un état pathologique, et dans l'autre, ils apparaissent en réponse à une situation où le stimulus visuel est très complexe (un idéogramme peut être composé de 23 segments différents) ou même absent. Quelle pourrait être la contribution de la motricité graphique pour des sujets normaux, qui utilisent des caractères simples comme ceux qui composent notre système alphabétique ?

Cette question est intimement liée à la manière dont ces caractères sont appris. Si, chez les sujets japonais, la reconnaissance visuelle d'idéogrammes est si dépendante de l'écriture, ce n'est pas simplement parce que ces derniers sont complexes. C'est aussi parce que les mouvements nécessaires à les former sont appris de manière très rigoureuse et répétitive, marquant sans doute fortement leur représentation en mémoire (Naka, 1998).

Notre approche a donc consisté à faire varier les conditions de la mise en place des liens entre forme visuelle du caractère et mouvement au cours de l'apprentissage, et à mesurer l'impact

de cette modification sur la reconnaissance subséquente des caractères. Pour cela, nous avons travaillé avec de jeunes enfants qui n'avaient pas encore commencé à lire et à écrire.

La méthode la plus immédiate, pour tester notre hypothèse, aurait consisté à comparer un apprentissage simultané de la lecture et de l'écriture à un apprentissage de la lecture seule. Cela aurait cependant posé des problèmes car nous aurions comparé une condition où les enfants seraient très actifs (apprendre à écrire) et une situation passive (apprendre les lettres en les regardant) en sachant que, dans cette situation, les enfants tenteront forcément de développer une certaine activité mentale qui sera mal contrôlée et probablement très différente d'un sujet à l'autre. Nous avons déjà rencontré de telles difficultés avec des sujets adultes (Longcamp, 2000). D'autre part, dans le cas particulier des enfants, il était essentiel de focaliser l'attention en utilisant un outil qui soit attrayant.

L'alternative consistait à modifier l'activité motrice en jeu au cours de l'apprentissage pour lui ôter son caractère « informatif ». La dactylographie nous a paru être un bon moyen pour y parvenir. En outre, la comparaison de l'écriture manuscrite avec la dactylographie avait beaucoup de sens si l'on se rappelle de la question posée à l'origine de ce travail.

L'écriture au clavier met également en jeu la motricité manuelle, mais les mouvements effectués sont qualitativement très différents. Alors que nous avons vu que la composante principale du mouvement d'écriture manuscrite est la composante morphocinétique, qui reproduit la forme, dans le cas de la dactylographie le mouvement est entièrement topocinétique : il s'agit, pour écrire une lettre, d'atteindre le point du clavier où elle se trouve. La correspondance entre le mouvement et la forme de la lettre devient arbitraire : en effet, un mouvement identique peut aboutir à produire deux lettres différentes et inversement, la même touche peut être atteinte par des mouvements différents (éventuellement produits par des doigts différents, voire de l'une ou l'autre main). Il n'y a donc pas une relation univoque entre la lettre à écrire et le mouvement. En tout état de cause, rien dans le mouvement d'atteinte des touches ne renseigne sur la forme ou l'orientation de la lettre correspondant à la touche frappée.

L'effet de ces apprentissages a été comparé en réalisant des tests de reconnaissance des lettres apprises. Rappelons que nous nous intéressons à des processus spatiaux, non à des processus linguistiques. Il ne s'agissait pas pour les enfants d'apprendre à lire, mais simplement à

reconnaître les lettres. Nous avons donc mis au point un test qui permettait d'évaluer à la fois les capacités à reconnaître la forme des lettres, mais aussi leur orientation. En effet, l'orientation semble être l'attribut spatial le plus difficile à discriminer, comme le montrent des études chez de jeunes enfants (Adams, 1990; Gibson et al., 1962) ou des lecteurs présentant des troubles de l'apprentissage (Liberman et al., 1971; Terepocki et al., 2002).

III. Influence de la motricité graphique sur la perception visuelle de lettres chez des enfants pré-lecteurs

Longcamp M., Zerbato-Poudou M.T. and Velay J.L. Writing practice influences the recognition of letters orientation in preschool children, (soumis)

1. Méthodes

L'expérience a eu lieu dans trois écoles maternelles du 9^e arrondissement de Marseille. Elle a été au préalable longuement discutée avec les enseignants des classes concernées, ainsi qu'avec l'inspectrice de circonscription qui a donné son accord sur la procédure. Les parents ont été informés par les enseignants de la teneur de l'expérience. Un des pré-requis de toute étude en milieu scolaire est sa non interférence avec le programme normal des apprentissages. L'initiation à l'écriture en maternelle se fait en général en cours de moyenne section (2^{ème} année). A ce moment, les enfants commencent la graphie proprement dite : ils apprennent à former les lettres, en commençant le plus souvent par celles qui constituent leur prénom. Il nous fallait absolument débiter avant cet apprentissage. Nous avons préparé l'expérience avec les enseignants concernés pendant l'année scolaire qui avait précédé (2000-2001), et avons convenu avec eux qu'il fallait commencer, pour la moyenne section, en Octobre-Novembre 2001. Nous voulions également faire cette étude avec des enfants encore plus jeunes, en classe de petite section (1^{ère} année). Avec eux, le problème n'était pas le même ; il fallait au contraire les laisser se familiariser avec l'environnement de l'école et nous avons décidé avec les enseignants de ne procéder à l'expérience qu'en Mai 2002.

Nous avons mis à profit les quelques semaines qui ont précédé la phase expérimentale pour constituer les fichiers qui contenaient les mots à écrire et les programmes qui nous ont permis de faire les tests de reconnaissance. L'ensemble a été installé sur 4 micro-ordinateurs (PC) qui ont été installés tour à tour dans les bibliothèques des écoles.

a. Protocole

Sujets et formation des groupes

Soixante seize enfants (41 garçons et 35 filles), appartenant à trois classes de maternelle, 2 classes de moyenne section et une classe de petite section, ont participé à l'expérience. L'âge moyen était de 4 ans, les âges s'étendant de 2:9 ans (33 mois) à 4:9 ans (57 mois). Constituer 2 groupes équilibrés à partir des 3 classes était un point crucial de l'étude. Pour cela, la semaine qui a précédé l'apprentissage en lui-même nous avons fait passer aux enfants une série de pré-tests.

- Les habiletés visuospatiales et graphiques ont été évaluées avec les test des figures géométriques de Bender. Ce test consiste à reproduire 10 figures géométriques de complexité croissante (voir annexe 1). Les figures sont notées sur 34 selon un barème prédéfini.
- La latéralité manuelle a été déterminée grâce à 5 items tirés du questionnaire d'Edinburgh (Oldfield, 1971). Les enfants devaient mimer ou réaliser directement les actions correspondant aux items (dessiner, lancer une balle, tenir des ciseaux, se brosser les dents, ouvrir un pot).
- Pour mesurer la dextérité manuelle, nous avons fait appel au test dit du 'peg-board'. Ce test consistait à placer le plus rapidement possible 9 petits pions cylindriques dans 9 trous de diamètre égal (1 cm) creusés dans une plaque située devant l'enfant. Nous notions le temps mis pour combler tous les trous avec les pions, ainsi que la main utilisée.

Ces pré-tests, ainsi que les variables individuelles (l'âge et le sexe) nous ont servi à répartir les enfants pour constituer les deux groupes. Les valeurs moyennes des différents indices utilisés sont détaillées dans le tableau 5. Les enfants de chaque classe ont été répartis de façon homogène dans les deux groupes, pour éviter un effet "classe". Nous avons ensuite vérifié avec les enseignants que les enfants de leur propre classe leur paraissaient répartis de façon équilibrée sur les 2 groupes. Ces derniers nous ont signalé en particulier les quelques enfants qui avaient déjà des connaissances de l'alphabet, ainsi que ceux qui présentaient des difficultés de compréhension des consignes.

groupe	effectif	âge (mois)	quotient de latéralité (%)	notation au test Bender (/34)	temps mis pour peg-board (s)
manuscrit	38 16 F 22 G	48,1	66,0	7,1	27,5
clavier	38 19 F 19 G	47,6	69,5	7,5	26,9

Tableau 5. Critères de répartition des enfants dans les deux groupes d'apprentissage

Apprentissage

Nous avons fait apprendre aux enfants 12 lettres majuscules (B, C, D, E, F, G, J, L, N, P, R, Z) qui ont été sélectionnées parce que leur image en miroir est différente de la lettre elle-même. Un des choix initiaux importants a été celui du type de lettre à faire apprendre. Nous avons opté pour les MAJUSCULES, plutôt que les lettres *script* ou les *cursives*, car ce sont les plus faciles à écrire, et c'étaient les lettres apprises en premier lieu dans les classes où nous avons travaillé. Par ailleurs, ce sont également les lettres présentes sur les touches des claviers. Ces lettres ont été incluses dans 4 mots (LAPIN, JOB, CERF, ZADIG). Chacune des 12 lettres à écrire n'était présente qu'une fois parmi les 4 mots. Les voyelles A, O et I, qui sont symétriques par rapport à la verticale, n'étaient là que pour constituer des mots, mais n'ont pas été utilisées pour les tests de reconnaissance. Les enfants avaient préalablement été familiarisés avec ces mots grâce à une histoire que l'enseignant avait racontée en classe pendant les semaines qui ont précédé le début de l'apprentissage.

L'apprentissage proprement dit a duré 3 semaines, à raison d'une séance d'une demi-heure par semaine et par enfant. Au cours de la troisième séance les lettres n'étaient plus incluses dans des mots, mais étaient présentées et copiées individuellement. Les mots ont été écrits dans le même ordre par les 2 groupes. Chaque stimulus était copié deux fois par séance. L'apprentissage était individuel, mais les enfants étaient pris par groupes de 4 et supervisés par 2 expérimentateurs.

Apprentissage par écriture manuscrite

Les modèles à copier (mots ou lettres) étaient présentés l'un après l'autre en haut à gauche de la feuille de papier (un mot ou une lettre par feuille), avec la consigne de les reproduire le plus exactement possible en dessous, avec un stylo feutre. A chaque changement de feuille, l'expérimentateur montrait chaque lettre en la nommant pour attirer l'attention de l'enfant sur

toutes les lettres. Au début de la première séance l'expérimentateur montrait systématiquement comment écrire le premier mot (JOB). Il n'y avait pas de nécessité de produire les lettres dans le bon ordre, ni de les disposer dans un espace particulier de la feuille. Il n'y avait pas non plus de consignes de taille, l'essentiel étant que la forme de chaque lettre soit reproduite.

Apprentissage par le clavier

Les modèles étaient présentés en haut à gauche de l'écran d'un ordinateur, avec la consigne de les reproduire le plus exactement possible en dessous, c'est à dire de repérer chaque lettre sur le clavier et d'appuyer dessus. Au début de la première séance l'expérimentateur montrait systématiquement comment écrire le premier mot (JOB). A chaque changement de mot, l'expérimentateur montrait chaque lettre du mot, en la nommant pour attirer l'attention de l'enfant sur toutes les lettres. Aucune consigne d'ordre d'écriture des lettres n'était donnée. Le clavier avait été aménagé pour la circonstance ; nous n'avions gardé que les 15 touches correspondant aux lettres nécessaires pour écrire les mots et elles avaient été regroupées au centre du clavier (voir figure 23). Cette procédure a nécessité la mise au point d'une police de caractères faisant correspondre la touche frappée avec la bonne lettre. D'autre part, la vitesse de répétition de frappe avait été diminuée dans le système d'exploitation (Windows 98) afin que des appuis prolongés sur une touche du clavier n'aboutissent pas à l'apparition d'une série de la même lettre. Les mots étaient affichés, un par écran, grâce à un fichier pré-établi créé à partir d'un logiciel de traitement de texte.



Figure 23. Clavier utilisé pour l'apprentissage des 12 lettres

Les touches correspondant aux lettres à apprendre ont été regroupées au centre du clavier. Les autres touches ont été enlevées, et le clavier couvert d'un revêtement plastifié. Une police spéciale a été créée pour que les lettres correspondant aux touches frappées s'affichent à l'écran.

Tests de reconnaissance

Un test de reconnaissance des caractères était effectué immédiatement après la 3^{ème} semaine d'apprentissage (**T1**). Le même test était répété une semaine plus tard (**T2**). En effet, comme le remarque Hulme (1979), les effets de la motricité sur la reconnaissance de formes graphiques sont généralement testés à court terme. Or, l'apprentissage de l'écrit est typiquement un processus inscrit dans le long terme. Nous avons donc été particulièrement attentifs aux éventuels effets du délai post-apprentissage.

A chaque essai, 4 caractères dont 3 étaient des 'distracteurs' étaient présentés sur l'écran d'un ordinateur et la tâche de l'enfant consistait à montrer du doigt celui qu'il reconnaissait comme ayant été appris. Aucune consigne de vitesse n'était donnée. Les distracteurs étaient de trois types (figure 24) : 1- même forme mais mauvaise orientation (lettre en miroir), 2- mauvaise forme et orientation correcte (partie de la lettre ajoutée ou enlevée), ou 3-mauvaise forme et mauvaise orientation (image en miroir du distracteur précédent). La variable mesurée était le nombre de réponses de chaque type : réponse correcte (**RC**), réponse en miroir (**RM**), réponse sur la lettre déformée (**RD**) et réponse sur la lettre déformée et en miroir (**RDM**). Il y avait 24 essais par test (chaque lettre et ses distracteurs étaient présentés deux fois, dans des positions différentes à chacun des essais). Pour les tests de reconnaissance, les enfants étaient pris séparément. Le test avait lieu devant un écran d'ordinateur, sujet et expérimentateur assis côte à côte, le sujet étant positionné à une quarantaine de centimètres de l'écran. La réponse donnée était enregistrée sur l'ordinateur par l'expérimentateur. La présentation des stimuli et l'enregistrement des réponses étaient contrôlés par un programme que nous avons développé au laboratoire (Labview).

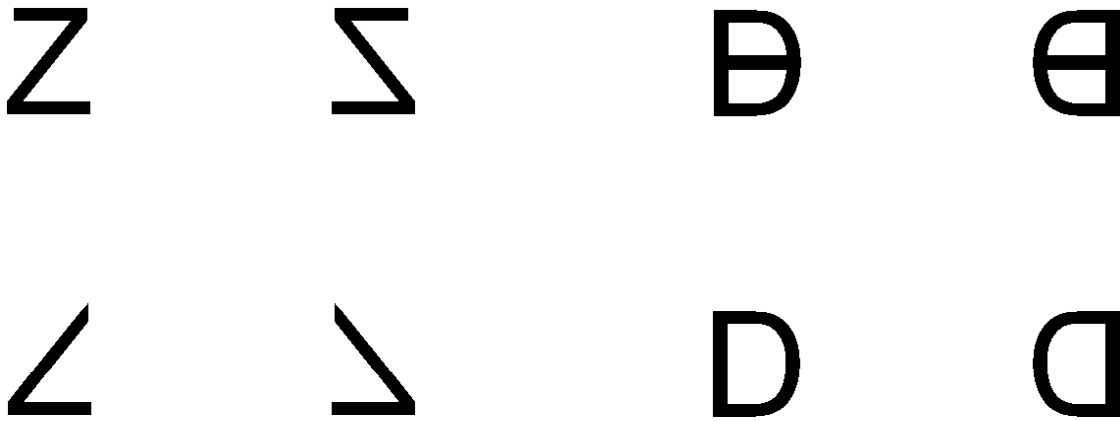


Figure 24. Deux exemples d'essais utilisés au cours du test de reconnaissance

Chaque lettre était présentée accompagnée de 3 distracteurs, dans lesquels la forme ou l'orientation étaient manipulés. Les stimuli mesuraient 30 mm de haut par 20 mm de large. L'enfant se tenait à environ 40 cm de l'écran. Les réponses données pouvaient donc être de 4 types : correctes (RC), sur la lettre en miroir (RM), sur la lettre déformée (RD) ou sur la lettre déformée en miroir (RDM).

b. Traitement des données

A l'issue de chacun des deux post-tests, nous obtenions donc un nombre de réponses, dans chacune des 4 catégories possibles. Un nombre égal de réponses donné dans les 4 catégories signifiait que, pour une raison ou une autre, l'enfant avait répondu au hasard. Des réponses au hasard ne pouvaient évidemment pas être prises en compte pour différencier les deux méthodes d'apprentissage. Nous avons donc réalisé une analyse préliminaire afin d'écarter les enfants qui avaient répondu au hasard. Nous avons choisi comme critère le nombre total de réponses données sur la forme correcte du caractère (RC + RM), indépendamment de son orientation, pour évaluer le seuil de hasard. En effet, comme nous l'avons mentionné plus haut, il est connu qu'à cet âge, les enfants discriminent mal l'orientation spatiale des caractères. Une analyse basée seulement sur le nombre de réponses correctes nous a paru trop restrictive dans un premier temps. Concrètement, nous avons sommé, pour chaque enfant, et en cumulant les deux tests, les réponses correctes et les erreurs en miroir. Lorsque cette somme était supérieure ou égale à 31 (sur 48 réponses au total, $\text{Chi}^2 = 4.08$, $p < .05$), le sujet était inclus dans les analyses ; dans le cas contraire il était écarté.

2. Résultats

a. Analyses préliminaires

Un enfant a directement été écarté du groupe « manuscrit », car il était absent au second post-test. Par ailleurs, les analyses préliminaires ont conduit à écarter 33 enfants et à en retenir 42. Les données présentées dans les tableaux 6 et 7 caractérisent les enfants respectivement retenus et écartés.

Groupe	effectif	âge (mois)	quotient de latéralité (%)	notation au test de Bender (/34)	temps mis pour peg-board (s)
Ecriture	22 8 Filles 14 Garçons	51	67	9,3	26,3
Clavier	20 12 Filles 8 Garçons	49,7	69	9,6	25,4

Tableau 6. Enfants retenus

groupe	effectif	âge (mois)	quotient de latéralité (%)	notation au test de Bender (/34)	temps mis pour peg-board (s)
écriture	15 8 Filles 7 Garçons	44	66,6	5,3	27,6
clavier	18 7 Filles 11 Garçons	45	70	5,1	28,6

Tableau 7 : Enfants écartés

Les enfants qui ont été retenus après le tri étaient globalement plus âgés (t de Student, $p < .001$), et avaient obtenu de meilleures notations au test de Bender (t de Student, $p < .01$) que ceux qui ont été rejetés. Il est important de voir que ces différences, lorsqu'elles existent, sont de même nature dans les deux groupes, et ne reflètent donc pas un effet du mode d'apprentissage mais sans doute simplement le fait que l'apprentissage, et par suite la tâche,

sont globalement mieux réussis par des enfants d'un certain âge et ayant des capacités d'analyse visuospatiale plus développées. D'autre part, et c'est le plus important, l'effectif des deux sous-groupes retenus ne diffère pas statistiquement ($\chi^2_1 = 0.35$, $p < 0.55$) : l'écriture manuscrite n'a pas permis à davantage d'enfants de réussir le test de reconnaissance que le clavier et réciproquement. Cela signifie que les deux modalités d'apprentissage ne se différencient pas en terme de réponses sur la forme globale des lettres. Les enfants ayant appris à la main ne parviennent ni mieux, ni plus mal que les enfants ayant appris au clavier à déterminer si la forme de la lettre est correcte. Cette équivalence des deux modes d'apprentissage pour les réponses globales sur la forme peut se préciser en réalisant une ANOVA sur une variable mixte englobant les RC et les RM. Cette analyse ne montre aucun effet significatif, confirmant que les deux échantillons sélectionnées sur cette base sont équivalents.

b. Analyse finale

Comme nous l'avons vu, la gamme d'âges des enfants retenus restait étendue (21 mois). A cette période du développement, un petit écart d'âge peut donner lieu à de grandes différences comportementales. En particulier, le niveau de développement sensorimoteur d'enfants de 3 ans et de 5 ans n'est évidemment pas le même. Puisque nous nous intéressions à l'apport des mouvements d'écriture à la reconnaissance subséquente des lettres, il nous a paru important de diviser chacun des deux groupes « écriture » et « clavier » en deux sous-groupes d'âge. La limite pour distinguer les enfants « jeunes » des enfants « âgés » a été fixée à 50 mois, valeur qui correspondait à la médiane d'âge des deux groupes « écriture » et « clavier ». Nos analyses finales incluaient donc 4 sous-groupes d'effectifs équivalents : les enfants « **manuscrit-âgés** », « **manuscrit-jeunes** », « **clavier-âgés** », et « **clavier-jeunes** ».

Les quatre catégories de réponses possibles (RC, RM, RD et RDM) ont été analysées par une ANOVA à trois facteurs, chacun à deux modalités : la modalité d'apprentissage (écriture manuscrite / écriture au clavier), l'âge (jeunes / âgés) et le délai post-apprentissage (T1 / T2). Ce dernier facteur était un facteur intra-groupe. Les ANOVAs réalisées sur les réponses RD et RDM n'ont donné lieu à aucun effet principal ni interaction significatifs. Nous avons donc centré nos analyses sur les RC et les RM.

Réponses Correctes (RC)

âge	< 50 mois		≥ 50 mois	
test	T1	T2	T1	T2
manuscrit	42.9	43.3	56.9	55.7
clavier	45.8	47.2	48.1	41.7

Tableau 8. Taux de RC (%)

Les résultats concernant les RC sont présentés dans le tableau 8 et sur la figure 25. Le nombre moyen de RC était de 11.5 (47 %). Aucun des facteurs principaux n'avait d'effet significatif. En revanche, l'interaction 'modalité d'apprentissage' par 'âge' était significative ($F(1, 38) = 5.26$, $p < .03$). Comme on peut le voir sur la figure 14, dans le cas de l'apprentissage manuscrit, les enfants âgés donnaient plus de RC que les enfants jeunes ($F(1, 38) = 8.81$, $p < .006$). Par contre, lorsque les enfants avaient appris au clavier, cet effet de l'âge était absent ($F < 1$). De plus, les enfants jeunes ne se différenciaient pas en fonction de la méthode d'apprentissage, tandis que chez les enfants plus âgés, l'écriture manuscrite donnait des résultats significativement meilleurs que l'écriture au clavier ($F(1, 38) = 6.22$, $p < .02$). Les autres interactions testées n'étaient pas significatives.

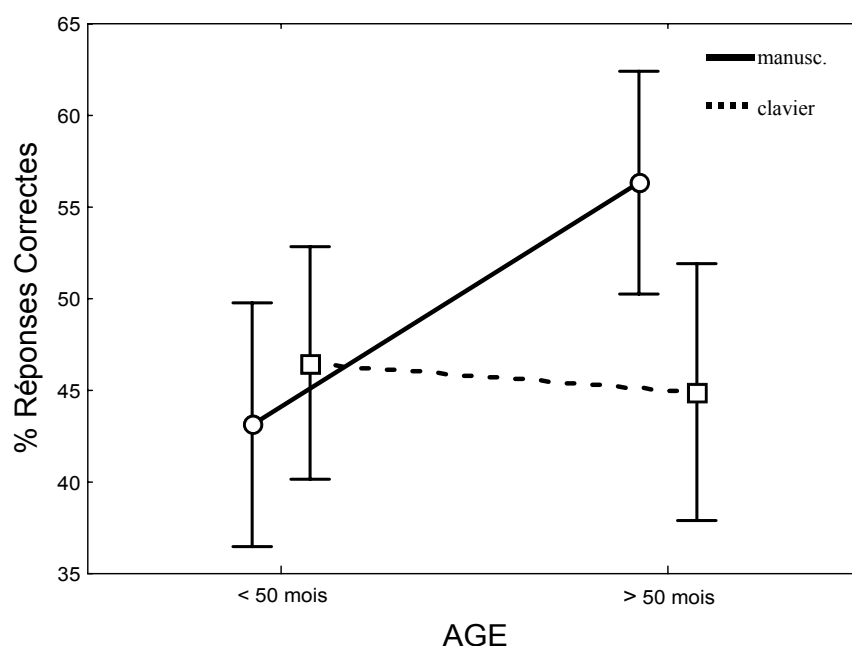


Figure 25. Pourcentages de Réponses Correctes moyens produits au cours des tests de reconnaissance

Les taux de RC sont représentés en fonction de l'âge des enfants (âgés, > 50 mois ou jeunes, < 50 mois) et de la modalité d'apprentissage. Les barres d'erreurs représentent les intervalles de confiance à 95 %

Réponses en Miroir (RM)

âge	< 50 mois		≥ 50 mois	
test	T1	T2	T1	T2
manuscrit	42.5	43.3	32.6	33.2
clavier	39.8	36.0	34.7	46.8

Tableau 9. Taux de RM (%)

Les résultats concernant les RM sont présentés dans le tableau 9 et la figure 26. Le nombre moyen de RM était de 9.3 (39%). Aucun des facteurs principaux n'avait d'effet significatif. En revanche, l'interaction 'modalité d'apprentissage' par 'âge' était significative ($F(1, 38) = 4.36$, $p < .05$). Dans le groupe « manuscrit » les enfants les plus âgés donnaient moins de réponses en miroir que les enfants plus jeunes ($F(1,38) = 5.55$, $p < .023$), alors que dans le groupe « clavier », la performance ne variait pas avec l'âge ($F(1, 38) = 0.41$). Remarquons que, dans le groupe « manuscrit », la diminution des RM avec l'âge expliquait presque entièrement l'augmentation des RC. En outre, l'interaction 'délai post-test' par 'âge' était significative ($F(1,38) = 4.20$, $p < .05$). Le nombre de RM n'évoluait pas de la même manière pour les enfants jeunes ou âgés. Enfin, l'interaction double 'modalité d'apprentissage' par

‘âge’ par ‘délai post apprentissage’ était elle aussi significative ($F_{(1,38)} = 4.55$, $p < .05$). Comme on peut le voir sur la figure 27, ces effets s’expliquent par le fait que juste après l’apprentissage (T1), il y a une différence en fonction de l’âge mais pas en fonction de la modalité d’apprentissage, tandis qu’une semaine plus tard (T2), le nombre de RM augmente fortement chez les enfants « âgés-clavier », alors qu’il reste stable dans les autres groupes.

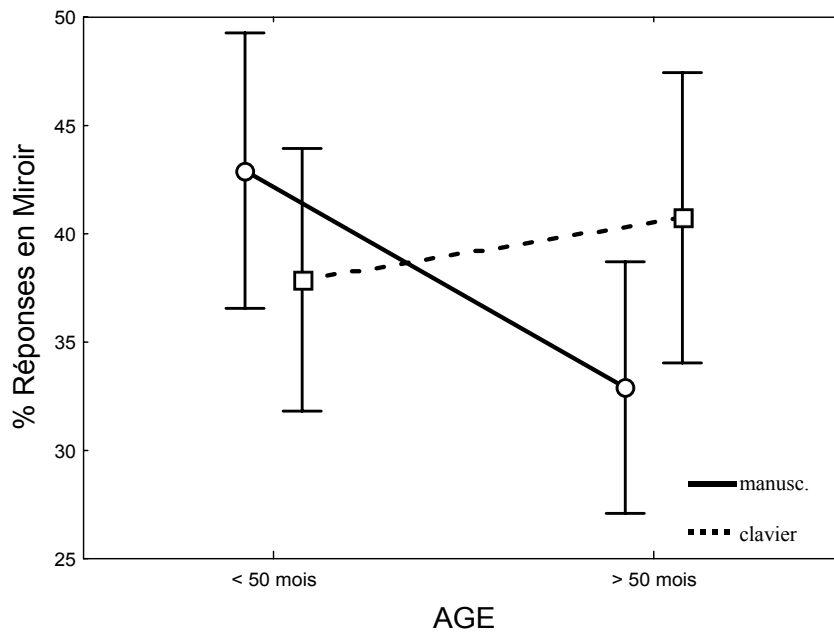


Figure 26. Pourcentages de Réponses en Miroir moyens produits au cours des tests de reconnaissance

Les taux de RM sont représentés en fonction de l’âge des enfants (âgés, > 50 mois ou jeunes, < 50 mois) et de la modalité d’apprentissage. Les barres d’erreurs représentent les intervalles de confiance à 95 %

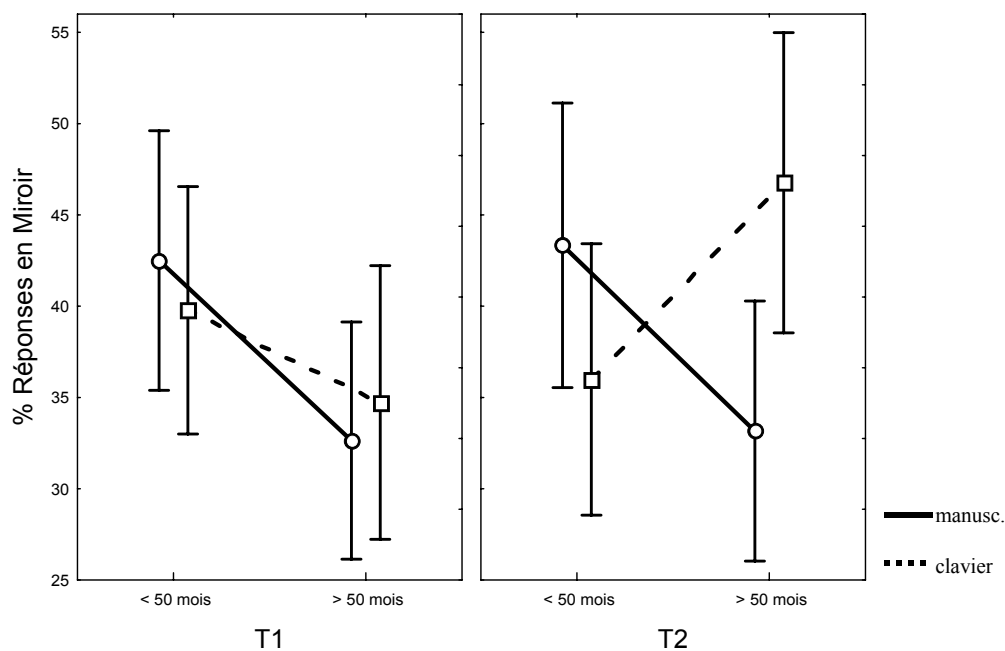


Figure 27. Pourcentages de Réponses en Miroir moyens produits aux deux délais post-apprentissage

Les taux de RM sont représentés en fonction de l'âge des enfants (âgés, > 50 mois ou jeunes, < 50 mois) et de la modalité d'apprentissage. Les barres d'erreurs représentent les intervalles de confiance à 95 %

c. Analyse par lettre

Nous avons effectué un tri des réponses données pour chaque lettre, afin de vérifier si les patterns de réponses observés dans les différents sous-groupes étudiés dépendaient des lettres. Pour cela, nous avons cumulé les réponses données par tous les enfants sur chaque lettre dans les deux tests. Nous avons divisé ce cumul par le nombre d'enfants, afin d'obtenir un taux de réponse par lettre et dans les différentes conditions expérimentales.

Les résultats bruts du tri des réponses par lettre sont donnés dans l'annexe 2. Nous allons simplement nous focaliser sur l'un des résultats les plus importants de cette expérience : la différence entre les enfants « âgés-manuscrit » et « âgés-clavier » en terme d'évolution du nombre de RM avec le délai post-apprentissage. Afin d'évaluer si cet effet apparaissait pour un type particulier de lettres, nous avons classifié les lettres apprises en fonction de leur complexité visuelle, d'après les critères de l'étude de Gibson et coll. (1962). La classification est décrite dans le tableau 10. Nous avons tenu compte du nombre de traits, du nombre de courbes, et de la présence de traits obliques pour calculer un score de complexité par lettre, en sommant le nombre de traits, le nombre de courbes, et en ajoutant un point si la lettre

contenait un trait oblique. Par exemple, le 'B' qui a trois traits et deux courbes, mais pas d'oblique est noté 5.

La figure 28 est une représentation graphique du nombre de RM données en fonction du score de complexité, pour les deux tests. Elle montre qu'à T1, la complexité n'a d'influence sur les réponses pour aucun des deux groupes (coefficients de corrélation = -0.01 et 0.038 respectivement). A T2 par contre, les deux groupes se différencient nettement : tandis que les réponses des « âgés-manuscrit » restent stables (coefficient de corrélation = 0.184), les réponses des « âgés-clavier » apparaissent fortement dépendantes de la complexité des lettres présentées (coefficient de corrélation = 0.612, significatif à $p < .05$).

lettre	nombre de traits	nombre de courbes	trait oblique	score de complexité
C	1	1c	n-o	2
J	1	1c	n-o	2
L	2	d	n-o	2
D	2	1c	n-o	3
F	3	d	n-o	3
G	2	1c	n-o	3
P	2	1c	n-o	3
E	4	d	n-o	4
N	3	d	o	4
Z	3	d	o	4
B	3	2c	n-o	5
R	3	1c	o	5

Tableau 10. Etablissement des scores de complexité pour les lettres utilisées dans l'expérience (c : courbe ; d : droite ; o : oblique ; n-o : non-oblique)

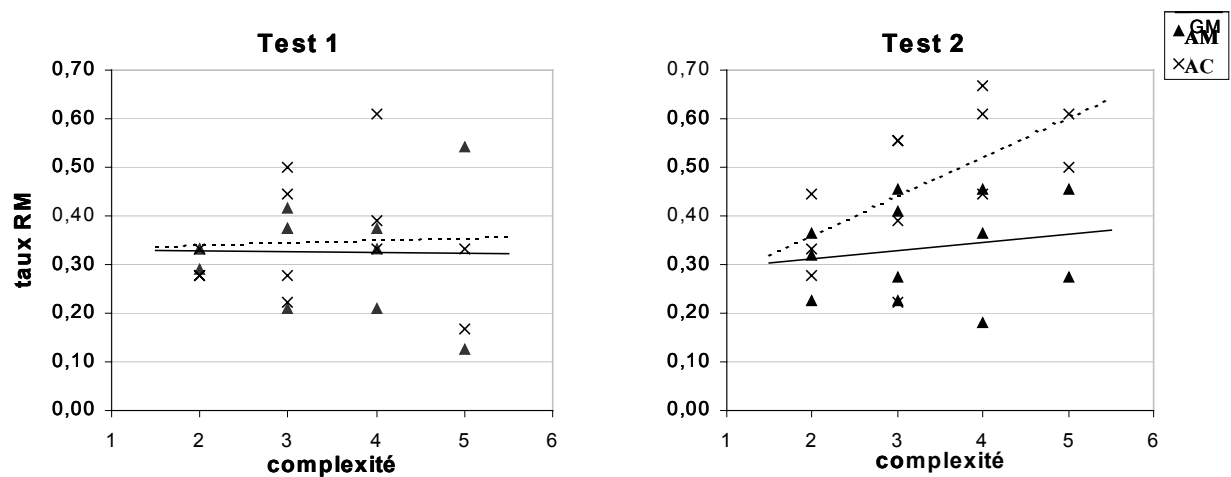


Figure 28. Résultats de l'analyse par lettre

Les taux de RM produits sur les différentes lettres apprises sont représentés en fonction de la complexité de la lettre (voir tableau 9 pour calcul du score de complexité) ainsi que de la modalité d'apprentissage chez les enfants âgés (AM et AC), pour les deux tests post-apprentissage.

3. Discussion

Les résultats montrent globalement que la capacité à reconnaître visuellement les lettres diffère selon la manière dont les sujets ont appris à les écrire. La reconnaissance visuelle est facilitée lorsque les lettres ont été écrites à la main. Les conditions d'apparition de cet effet peuvent être résumées en trois points, qui seront discutés successivement :

- Le nombre plus élevé de réponses correctes chez les enfants « âgés - manuscrit » est dû à un nombre moins élevé d'erreurs sur les lettres en miroir. Chez ces enfants, l'écriture manuscrite a donc pour effet spécifique une meilleure discrimination de la lettre par rapport à son image en miroir. En outre, comme l'indique l'analyse par lettre, les différences portent majoritairement sur les lettres les plus complexes visuellement.
- L'effet de la motricité graphique ne se manifeste pas immédiatement après la fin de l'apprentissage, mais plusieurs jours après. Les performances sur les lettres apprises à la main restent stables, tandis que les lettres apprises au clavier sont oubliées à long terme.
- Enfin, l'interaction « âge x modalité d'apprentissage » indique que l'effet de la motricité utilisée pour écrire n'apparaît que chez les enfants les plus âgés.

Nous l'avons déjà mentionné, les études qui se sont précédemment intéressées à cette question, chez l'enfant ou l'adulte, ont abouti à des conclusions contradictoires, sans doute parce qu'elles ne ciblaient pas exactement les mêmes aspects du phénomène, et n'utilisaient pas les mêmes paradigmes ni les mêmes groupes d'âge. Par exemple, certaines ont évalué l'effet du traçage avec le doigt ou avec un crayon par dessus la forme (Courrieu & De Falco, 1989; Hulme, 1979; Hulme et al., 1987) et d'autres, de la copie (Naka & Naoi, 1995; Naka, 1998). Elles ont utilisé une série de tâches extrêmement variées : tâche de rappel libre (rappeler par écrit le maximum d'items, Naka & Naoi, 1995; Naka, 1998), de dénomination (Hulme et al., 1987), de reconnaissance (Hulme et al., 1987; Naka & Naoi, 1995), d'appariement (Courrieu & De Falco, 1989). Nous allons tenter d'explicitier les effets que nous obtenons, étant données les conditions expérimentales que nous avons utilisées.

a. Effet sur l'orientation spatiale des caractères

Les enfants âgés ayant appris à la main reconnaissent mieux les lettres. Cet avantage s'expliquait toutefois par le fait qu'ils produisaient moins d'erreurs en miroir que les enfants ayant appris au clavier. La première chose à noter est que, conformément à nos hypothèses, l'effet portait sur une caractéristique typiquement spatiale du stimulus. Qu'apporte donc la motricité de l'écriture manuscrite qui manquerait à la dactylographie et aurait permis aux sujets de reconnaître l'orientation des caractères appris ? Il existe deux explications possibles, qui ne sont pas exclusives (et sont même sans doute complémentaires). D'abord, il est possible que le codage moteur en lui même apporte une information que n'apporte pas la vision seule, une information sur la « polarité » de la lettre. En effet, alors que le caractère et son image en miroir sont très proches sur le plan visuel (nombre de segments, courbes, diagonales...), le mouvement à réaliser pour écrire l'un et l'autre est fondamentalement différent. Goodnow et Levine (1973) ont décrit une « grammaire de l'action », c'est à dire une série de préférences hiérarchisées portant notamment sur le point de départ de la trajectoire, la direction et le sens des traits, qui se manifestent dans des activités de copie et émergent progressivement chez l'enfant pour devenir quasi-systématiques chez l'adulte (voir aussi (Thomassen et al., 1991). Ces préférences ont sans doute pour origine à la fois la conformation anatomique du système effecteur (bras-main) et la présence d'un système de référence interne orthogonal (horizontal-vertical) (Meulenbroek & Thomassen, 1991). De la grammaire de l'action va dépendre l'ordre dans lequel la séquence de traits va être réalisée,

c'est à dire la trajectoire suivie et donc la composante morphocinétique du mouvement graphique, celle là même qui sera codée en mémoire sous la forme d'un programme moteur. Ainsi, les programmes moteurs correspondant à une lettre et à son miroir pourraient être très différents. Il est par conséquent possible que la comparaison entre la forme visuelle perçue et le programme moteur stocké en mémoire puisse permettre d'éviter une confusion entre le caractère et son miroir. Rappelons que des données comportementales (Wexler et al., 1998) et de neuroimagerie (Lamm et al., 2001; Mellet et al., 1996; Richter et al., 2000) indiquent que des tâches de rotation mentale d'objets bi- ou tri-dimensionnels font appel à de la motricité manuelle implicite, ce qui indique que les informations motrices peuvent être cruciales dans des conditions où une décision doit être prise sur la base des caractéristiques spatiales du stimulus. En outre, de manière particulièrement intéressante, la perception de l'orientation des objets et des lettres peut être sélectivement perturbée, chez des patients conservant des capacités de reconnaissance quasi-normales, après des lésions dans la voie visuelle dorsale (voir Karnath et al., 2000).

Une autre possibilité pour expliquer cet effet sur l'orientation est qu'il manifestait simplement une meilleure reconnaissance des caractères, comme l'affirme Adams (1990, p349). La motricité n'apporterait pas d'information de nature différente au codage visuel, mais en tant que mode de codage supplémentaire de la forme, permettrait d'enrichir la représentation individuelle de chaque caractère et donc de mieux le reconnaître. La situation de discrimination entre la lettre et son miroir peut être considérée comme perceptivement complexe, et dans certains cas difficile à résoudre sur la base de l'information visuelle seule. Si nous revenons aux considérations énoncées en introduction de cette partie expérimentale, nous avons fait l'hypothèse que l'une des fonctions possibles du codage moteur des caractères serait de permettre de désambiguïser des situations dans lesquelles la vision se trouverait en difficulté (nous avons cité des cas pathologiques ou des cas où le stimulus est complexe car formé de nombreux traits). Cette interprétation est étayée par l'analyse des réponses par lettre, qui montre que les lettres les plus fréquemment confondues par les sujets ayant appris à écrire au clavier sont les lettres les plus complexes. Les réponses données sur les lettres simples comme le 'L' ou le 'J' ne sont pas différentes dans les deux groupes, et ne nécessitent donc probablement pas l'intervention du codage moteur.

Plus simplement, il est possible que le codage moteur des caractères soit effectivement pertinent pour spécifier leur orientation, mais qu'il ne devienne crucial pour la performance que lorsque la situation est visuellement ambiguë. Il serait particulièrement intéressant dans ce cadre d'évaluer l'effet de la dégradation de l'information visuelle apportée, par exemple en

bruitant les stimuli ou en les présentant très brièvement, afin de voir si le poids donné à l'information motrice dans la perception varie. D'autre part, nous avons déjà mentionné que lorsque l'information visuelle est absente, et que le sujet doit donner un jugement sur la forme d'un caractère en l'imaginant mentalement, il semble se baser sur ses connaissances des mouvements d'écriture (Kosslyn et al., 1988; Kosslyn et al., 1997; Raij, 1999). Dans l'écriture au clavier, un mouvement de la main était aussi associé à l'image visuelle du caractère au cours de l'apprentissage et permettait sans doute de focaliser l'attention visuelle des sujets, mais ce mouvement de pointage n'apportait aucune information sur la forme du stimulus, ni sur son orientation.

Nous résultats divergent de ceux de Courrieu et De Falco (1989) qui n'ont pas observé d'effet du mouvement d'écriture sur les capacités subséquentes de jeunes enfants à différencier des lettres spatialement ambiguës comme le 'b' et le 'd'. Dans leur expérience, la situation d'écriture consistait à repasser par dessus des modèles des lettres figurant la dynamique du mouvement. L'ordre de la séquence était donc contraint, ainsi que les sens de rotation. Il est possible qu'avec cette méthode les enfants n'aient pas eu la liberté de construire des programmes moteurs en fonction de leurs propres préférences. D'autre part, et c'est important, les tests n'ont été réalisés qu'immédiatement après l'apprentissage, alors que nous avons observé que l'effet de la motricité graphique se manifeste plus fortement après un certain délai.

b. Effet du délai post-apprentissage

La seule étude ayant tenu compte de cette variable est celle de Hulme et coll. (1987). Ces auteurs ont observé que, pour des enfants de 7-8 ans, tracer les lettres était une méthode plus efficace pour apprendre leur nom que simplement les pointer avec le doigt (ce qui peut se rapprocher de notre condition clavier). Cet avantage se maintenait trois jours après la fin de l'apprentissage, le taux d'oubli étant comparable pour les deux méthodes. Nos résultats sont un peu différents, puisqu'ils montrent que les performances ne diffèrent pas à court terme, qu'elles restent très stables à long terme pour les lettres apprises à la main, tandis qu'elles se détériorent nettement pour les lettres apprises au clavier. Des données récentes sur le décours en mémoire des apprentissages moteurs peuvent aider à expliquer cet effet.

D'abord, contrairement à toutes les autres études citées, nous avons échelonné l'apprentissage sur trois semaines. Ce fait est important car nous avons ainsi réellement favorisé la création et

la mémorisation de programmes moteurs, en plus de l'apprentissage visuel, dans le cas de l'écriture manuscrite. Des données de neuroimagerie de plus en plus nombreuses indiquent que l'acquisition de séquences motrices implique des substrats cérébraux différents selon la phase d'apprentissage, notamment avec le recrutement du cervelet ipsilatéral à la main utilisée dans les premières étapes, qui disparaît avec l'entraînement pour être remplacé par la mise en jeu du striatum ipsilatéral (Doyon et al., 2003; Ungerleider et al., 2002) et de structures corticales pariétales et frontales (Doyon et al., 2003; Shadmehr & Holcomb, 1997). Le fait de réaliser plusieurs sessions d'apprentissage, en réactivant et en reconsolidant la trace mnésique, a probablement permis de créer un codage moteur plus stable des caractères appris. D'autre part, lorsque l'entraînement se termine, la représentation de la séquence apprise évolue encore sur une longue période de temps. Les études qui se sont intéressées à la dynamique de l'acquisition de nouvelles habiletés motrices décrivent des effets comportementaux montrant que la consolidation en mémoire se fait en plusieurs phases, allant de quelques heures à plusieurs jours (Walker et al., 2003). Les performances pour les mouvements appris restent par la suite stables sur plusieurs semaines voire plusieurs mois (Penhune & Doyon, 2002; Shadmehr & Brashers-Krug, 1997). Par ailleurs, il a été démontré que la trace neurale d'apprentissages moteurs continue à se modifier après la fin de l'entraînement, recrutant de plus en plus les aires motrices corticales (Penhune & Doyon, 2002; Ungerleider et al., 2002). Ces données indiquent que nos conditions expérimentales étaient sans doute propices à la mise en place progressive et durable de représentations motrices.

Si l'on admet que la motricité utilisée pour écrire les caractères au clavier n'était pas informative, et que dans cette situation, les sujets ne se basaient que sur la trace en mémoire de la forme visuelle globale, on peut faire l'hypothèse que cette trace visuelle seule était probablement moins stable que lorsqu'elle était associée à la trace motrice créée par l'acte d'écriture. L'oubli de la forme visuelle n'était pas immédiat, mais après un certain délai, les caractères étaient néanmoins reconnus moins précisément. La consolidation en mémoire des connaissances visuelles a été moins systématiquement étudiée que celle des habiletés motrices. Elle n'a, à notre connaissance, pas été étudiée chez l'homme sur des périodes de plusieurs semaines. Des études comportementales ont mis en évidence une diminution des taux de rappel avec le temps, après des apprentissages de matériel verbal ou visuel, mais les causes des phénomènes d'oubli sont encore mal connues (Fioravanti & Di Cesare, 1992; Zola-Morgan & Squire, 1990). Ainsi, il est probable que lorsqu'elle est le résultat d'une association entre vision et mouvement d'écriture, la trace en mémoire de la forme des

caractères soit plus résistante à l'oubli. Cette hypothèse demanderait néanmoins à être confirmée, par exemple en mesurant les performances des sujets en écriture à de longs délais après la fin de l'apprentissage, pour évaluer l'évolution et la disponibilité de la représentation motrice en mémoire.

c. Apprentissage et facteurs développementaux

Chez les enfants les plus jeunes (moins de 50 mois, 4:2 ans), la motricité de l'écriture manuscrite ne facilitait pas la discrimination des lettres et de leurs images en miroir. Ce résultat pourrait s'expliquer en évoquant l'évolution rapide des capacités mnésiques, qui est nette chez des enfants si jeunes, à la fois pour les capacités de mémoire de travail (Luciana & Nelson, 1998) et de reconnaissance explicite (Russo, 1995). Cependant, si des facteurs développementaux perceptifs ou mnésiques avaient eu une forte influence sur les réponses des enfants, nous aurions dû observer un effet global de l'âge en plus des autres effets, ce qui n'était pas le cas. Dans la plupart des comparaisons, les performances des enfants jeunes, quel que soit leur groupe, ne différaient pas de celles des enfants âgés du groupe clavier. Il convient donc plutôt d'expliquer pourquoi les enfants du groupe « jeunes-manuscrit » ne bénéficiaient pas de l'apprentissage par l'écriture comme leurs camarades plus âgés. La raison principale de cette différence liée à l'âge est probablement que chez ces enfants, les processus de contrôle moteur nécessaires pour écrire n'étaient pas assez matures. Des enfants de 3-4 ans sont capables de comprendre la différence entre dessin et écriture, et possèdent les compétences perceptives et motrices nécessaires pour tracer des lettres (Lurçat, 1980). Pourtant, dans ces toutes premières étapes, les habiletés motrices fines sont très loin d'être complètement développées.

Du point de vue neuroanatomique, d'abord : une étude récente en IRM structurale a montré que le faisceau cortico-spinal, qui contrôle les mouvements fins de la main augmente nettement en densité depuis l'âge de 4 ans jusqu'à l'adolescence (Paus et al., 1999). Le corps calleux subit lui aussi une maturation lente (Rauch & Jinkins, 1994), conduisant à un développement progressif des relations inter-hémisphériques impliquées dans les coordinations visuo-motrices entre 4 et 14 ans (Hay & Velay, 2003). Il semble donc effectivement que d'un point de vue neurophysiologique les structures sous-tendant des fonctions motrices cruciales pour l'écriture sont celles qui mûrissent le plus lentement.

Du point de vue comportemental et fonctionnel, ensuite : Van Galen (1980) a travaillé avec des enfants de 4 à 6 ans. En étudiant les temps de latence lorsque les sujets copiaient des formes géométriques, ils ont démontré que des programmes moteurs pouvaient être préactivés chez des enfants de cet âge. Cependant, cet effet s'observait surtout chez les enfants dont le niveau de développement moteur était plus élevé (qui utilisent préférentiellement leur motricité distale). Ceci confirme l'importance des facteurs de développement moteur dans l'écriture. D'autre part, plus les enfants sont âgés et maîtrisent leur motricité, plus les programmes moteurs préactivés pourront être de grande taille et éventuellement décrire l'ensemble de la lettre (Nihei, 1983). Il est possible que les enfants les plus jeunes, aient eu plus de difficultés à établir des programmes moteurs de taille importante, et par conséquent à construire une représentation globale des lettres. Enfin, il a été suggéré que le développement de l'écriture est caractérisé par une augmentation de l'efficacité à inhiber le bruit du système neuromoteur (van Galen et al., 1993). A des âges identiques, ce niveau de bruit est plus important chez des scripteurs pauvres et les enfants dysgraphiques, comme si ces sujets étaient incapables de répondre aux demandes de précision de la tâche tout en inhibant le bruit neuromoteur (Smits-Engelsman & van Galen, 1997).

Il est donc probable que des facteurs liés à la fois à la programmation et à l'exécution des mouvements d'écriture aient empêché les enfants les plus jeunes de tirer bénéfice du codage moteur des lettres, qui, parce que bruité et sans doute trop segmenté, n'était pas source d'information pertinente.

IV. Synthèse

Nous avons approché la question des interactions perceptivo-motrices dans le langage écrit par deux voies très différentes mais qui ont chacune contribué à fournir des éléments de réponse.

Les expériences en IRMf chez les adultes nous ont permis de mettre en évidence des activations motrices dans une tâche de perception passive de lettres. Nous avons fait l'hypothèse, à partir d'un certain nombre d'arguments que ces interactions perceptivo-motrices étaient la conséquence de l'apprentissage conjoint de la lecture et de l'écriture au cours de la petite enfance. Ces données de neuroimagerie, si elles ont beaucoup fait avancer notre réflexion, ne nous ont pas permis de conclure formellement sur ce point toutefois. Pour vérifier cela, nous avons envisagé de travailler avec des populations ayant une expérience atypique avec l'écriture, comme des dactylographes ou des calligraphes professionnels. Mais dans tous les cas, nous ne pouvions nous affranchir d'un problème important : même si ces sujets avaient acquis, professionnellement ou non, une manière d'écrire particulière, ils avaient tous initialement appris les lettres de la même manière : en les traçant. Par ailleurs, si nous avons pu prouver que les activations motrices étaient bien la conséquence directe du mode d'apprentissage de l'écrit, la question du rôle fonctionnel de ces interactions perceptivo-motrices restait entière. En effet, les activations observées pourraient ne refléter qu'un vestige d'une association ancienne entre lecture et écriture des lettres mais ne pas participer à la reconnaissance des lettres.

Les enfants étaient la population idéale pour répondre à ces deux questions, car nous pouvions avoir accès à l'origine des interactions perceptivo-motrices au cours de l'apprentissage, sans interagir avec des représentations préexistantes liées à la connaissance du langage écrit. Nous pouvions de ce fait modifier les liens fonctionnels entre lecture et écriture. Mais cela avait aussi un certain nombre d'inconvénients. D'abord, l'environnement expérimental (la bibliothèque de l'école) était moins contrôlé qu'une salle d'expérience insonorisée et close. Mais cela ne nous paraît pas être l'inconvénient principal, car si l'environnement n'était pas contrôlé au maximum, il était néanmoins familier aux enfants, ce qui nous semblait important pour que ces derniers soient en confiance et motivés (et donc pour la validité des résultats). Un autre problème, plus notable, était que des enfants si jeunes ne peuvent pas participer à des

expériences trop longues, car, nous avons pu en juger, leur attention se dissipe très vite. La durée des apprentissages en était de fait limitée. Mais surtout, les tests, qui demandent de la concentration, ne pouvaient pas excéder une durée de quelques minutes. Le nombre d'essais était donc obligatoirement faible, ce qui pose des problèmes de variabilité et donc de puissance statistique. En outre, nous ne pouvions pas prolonger ni les apprentissages, ni les délais auxquels nous réalisions les tests, car il ne fallait pas que les expériences interagissent avec le décours normal des apprentissages scolaires. Le dernier inconvénient était, bien entendu, que nous ne pouvions avoir accès aux corrélats neuraux des effets, toute expérience en IRMf étant inenvisageable.

La manière la plus immédiate de contourner l'ensemble de ces problèmes, et de fusionner les deux approches déjà mises en œuvre, était d'utiliser une situation dans laquelle *des sujets adultes apprenaient de nouveaux caractères*. Ainsi, nous pouvions mesurer à la fois les performances comportementales et l'activité cérébrale induites par l'apprentissage. Nous avons donc récemment mis au point un nouveau paradigme expérimental qui consiste à comparer, chez des adultes, deux modes d'apprentissage des caractères, l'apprentissage traditionnel par l'écriture manuscrite et l'apprentissage au clavier, comme nous l'avions fait précédemment avec les enfants. Pour étudier l'évolution des représentations cérébrales des caractères appris selon ces deux modalités motrices, nous avons pratiqué un examen IRMf chez chaque sujet, avant et après l'apprentissage des lettres, dans des conditions très proches de celles des expériences précédentes chez les adultes.

V. Apprentissage, par des sujets adultes, de formes graphiques inconnues par écriture manuscrite et dactylographie

Le paradigme expérimental a donc consisté à mesurer l'activité cérébrale générée par la perception des caractères quelques temps avant qu'ils ne soient appris. Chaque sujet a donc participé à une expérience en IRMf au cours de laquelle il/elle découvrait ces nouveaux caractères. Quand tous les examens IRMf préalables étaient effectués, nous avons fait apprendre à ces mêmes sujets les caractères dans les conditions qui vont être détaillées plus loin. Cette phase d'apprentissage a duré 3 semaines. Après l'apprentissage, des tests de reconnaissance ont été effectués à plusieurs reprises. En parallèle, après l'apprentissage, les sujets ont participé à un nouvel examen IRMf, en tous points identique au premier. La durée totale de l'expérimentation a été de 6 à 7 semaines. Il est évident que l'investissement en temps d'expérimentation est important, surtout pour les sujets qui doivent participer à plusieurs séances d'apprentissage, à plusieurs tests, et à deux examens en IRMf. Nous avons préféré procéder à une expérience 'pilote' conduite sur seulement 6 sujets dont nous ne sommes en mesure aujourd'hui que de relater les résultats comportementaux car les données IRMf sont encore en cours de traitement. Les résultats comportementaux eux-mêmes sont préliminaires, mais il nous a paru pertinent de les présenter, car ils sont tout à fait concordants avec les données obtenues chez les enfants.

Par ailleurs, nous avons également enregistré, au cours de l'apprentissage, les mouvements d'écriture sur tablette graphique pour l'apprentissage de l'écriture manuscrite, et la latence des frappes, pour l'apprentissage sur le clavier. Ces différentes variables nous permettront de connaître avec précision le niveau exact de chaque sujet, ce qui par suite pourra permettre de faire des corrélations avec les données issues de l'IRMf.

1. Méthodes

Six sujets droitiers adultes, 4 hommes et 2 femmes, d'âge compris entre 24 et 26 ans, ont participé à l'expérience. Celle-ci se déroulait dans une salle du laboratoire, dans laquelle étaient installés les deux postes d'apprentissage. Les tests de reconnaissance étaient effectués dans la même salle, sur l'un des deux ordinateurs utilisés au cours de l'apprentissage.

a. Matériel

Il fallait choisir avec beaucoup d'attention les caractères à faire apprendre aux sujets, pour qu'ils soient suffisamment différents des formes graphiques déjà connues. Nous avons sélectionné trois polices de caractères, provenant de trois systèmes graphiques utilisés en Asie du sud-ouest. Ces polices ont été choisies car les caractères qui les composent se distinguent fortement de nos caractères romains et qu'elles sont bien distinguables entre elles. Suite aux résultats obtenus chez les enfants, nos investigations se sont focalisées uniquement sur la discrimination entre le caractère et son image en miroir. Dans chaque police, nous avons donc extrait les caractères asymétriques par rapport à la verticale, c'est à dire dont l'image en miroir est différente du caractère lui-même. Nous avons ensuite trié ces caractères suivant deux étapes. D'abord, cinq sujets naïfs ont donné à chaque caractère un score de complexité visuelle sur une échelle de 1 à 10, et ont signalé le cas échéant si le caractère évoquait une forme ou un objet particulier. En effet, nous voulions sélectionner des caractères les plus « neutres » possibles pour éviter un éventuel moyen mnémotechnique pour les mémoriser. La complexité des trois séries de caractères restants a été réévaluée plus directement dans un second temps sur 6 sujets naïfs. Pour cela, nous avons réalisé des tests de discrimination au cours desquels nous présentions brièvement le caractère accompagné soit du même caractère soit de son image en miroir. Nous demandions au sujet de répondre s'il s'agissait bien du même caractère. Grâce à ces deux procédures, nous avons finalement sélectionné une série de 10 caractères pour chacune des 3 polices, les trois séries ayant globalement une complexité équivalente (voir figure 29).

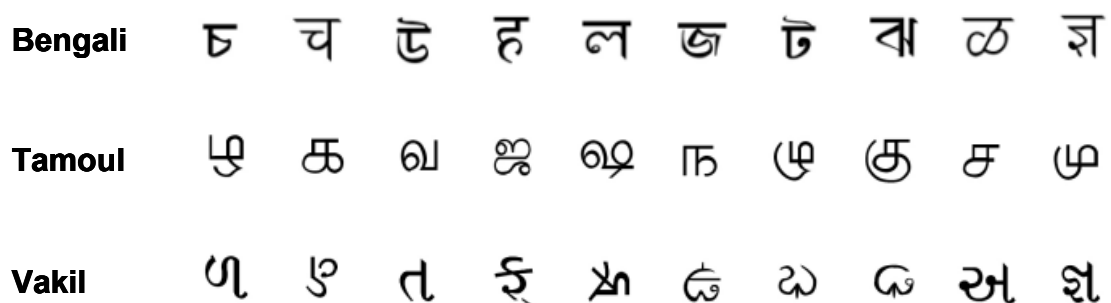


Figure 29. Polices de caractères utilisées

b. Procédure

Phase d'apprentissage

Contrairement à l'expérience précédente, dans laquelle de nombreux enfants ont participé, et où 2 groupes ont appris l'ensemble des caractères par l'une ou l'autre méthode (comparaison 'inter-sujets'), l'apprentissage se déroulait cette fois en 'intra-sujet'. En d'autres termes, chaque sujet apprenait à écrire deux polices, dans deux modalités faisant intervenir la motricité de manière différente (« manuscrit » ou « clavier »). La 3^{ème} police n'était pas apprise par les sujets : elle était destinée à servir de contrôle pour le protocole IRMF. L'association police-modalité d'apprentissage a été contre-balançée pour les 6 sujets, de manière à ce qu'une police donnée ne soit pas systématiquement apprise dans la même modalité chez tous les sujets. Par conséquent, la police « tamoul » a été apprise à la main par 2 sujets, la police « bengali » par 2 autres, la police « vakil » par 2 autres et de même pour l'apprentissage par le clavier. Il y a eu trois séances d'apprentissage étalées sur trois semaines, avec la consigne de ne pas s'entraîner à écrire entre les séances. Le but était d'apprendre à écrire les caractères le mieux et le plus vite possible : les sujets n'étaient pas informés qu'ils devraient ensuite les reconnaître visuellement au cours de tests. Les matériels et les protocoles expérimentaux correspondant aux deux modalités d'apprentissage (« manuscrit » et « clavier ») sont décrits sur la figure 30. Dans les deux cas, les caractères étaient présentés séquentiellement sur un écran d'ordinateur dans un ordre aléatoire, durant 4 secondes, et étaient précédés d'une croix de fixation de 3 secondes et d'un signal sonore. Chaque caractère était copié 20 fois par séance (200 caractères copiés au total par modalité).

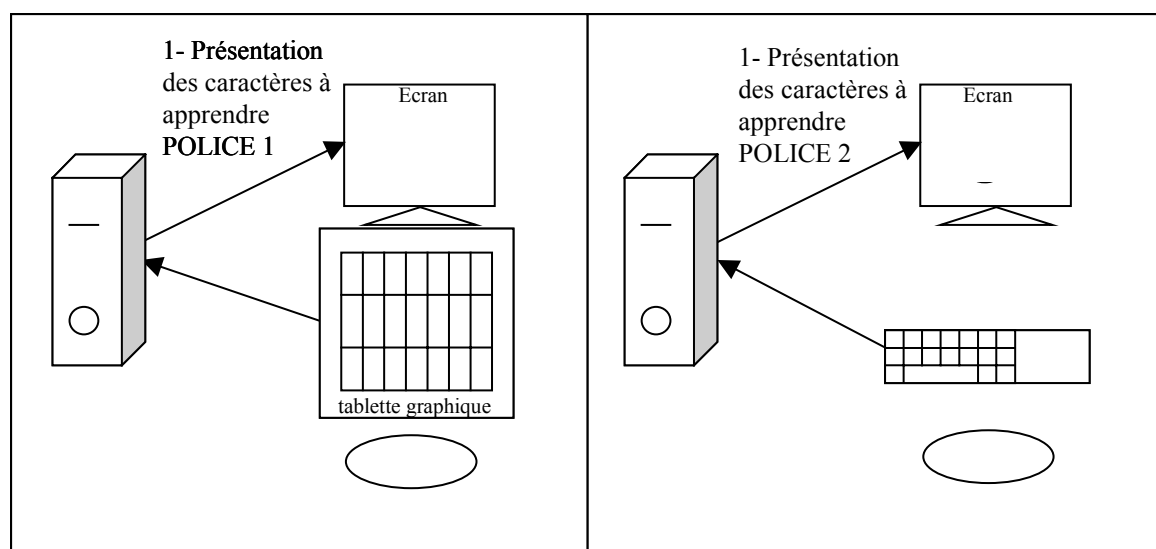


Figure 30. Postes expérimentaux d'apprentissage

Chaque sujet réalisait les deux apprentissages au cours d'une séance, chaque apprentissage portant sur une police différente.

Apprentissage par écriture manuscrite

Les sujets étaient assis face à un écran et devaient écrire les caractères présentés dans chacune des 50 cases dessinées sur une feuille de papier. La feuille était placée sur une table à digitaliser (Summagraphics, Microgrid II) et les sujets écrivaient avec un 'stylo' qui laissait une trace sur le papier et dont le déplacement était simultanément enregistré par l'ordinateur. Chaque case avait une largeur de 6 cm et une hauteur de 8 cm. Dans les limites définies par les cases, les sujets étaient libres d'écrire à la taille qui leur convenaient. L'affichage s'interrompait lorsque 50 caractères étaient écrits. Une pause d'une minute était faite et l'expérimentateur changeait la feuille et lançait l'affichage de la série suivante pour la suite de l'apprentissage. Les 200 caractères étaient donc affichés en 4 blocs de 50.

Apprentissage par le clavier

Les sujets, assis à une table sur laquelle était placé l'écran et le clavier d'un ordinateur, devaient frapper le caractère présenté à l'écran sur la touche correspondante du clavier. Trois claviers, correspondant à chacune des 3 polices de caractères, étaient connectés simultanément à l'ordinateur et l'expérimentateur choisissait celui qui correspondait à la police que devait apprendre le sujet (les 2 autres claviers étaient masqués à sa vue). Chaque clavier ne comprenait que 10 touches sur lesquelles avaient été collées les images des 10 caractères d'une des polices. Les sujets devaient frapper les touches en utilisant seulement

l'index de leur main droite. Comme c'était le cas pour l'apprentissage manuscrit, les 200 caractères appris étaient affichés en 4 blocs de 50. A la fin d'une série, une pause d'une minute était faite pendant laquelle l'expérimentateur changeait la série à afficher sur l'écran.

L'ordre de passation des modalités d'apprentissage était équilibré d'un sujet à l'autre et alternait, pour un sujet donné, d'une séance à l'autre. Une séance d'apprentissage durait environ 1 heure, soit 30 minutes par modalité.

Tests de reconnaissance de l'orientation du caractère

Le test destiné à quantifier l'avantage de l'une ou l'autre des modalités d'apprentissage consistait à déterminer si le stimulus présenté brièvement à l'écran était un des 20 caractères appris ou son image en miroir. Le sujet était assis et avait la tête posée sur une mentonnière, ce qui fixait la position des yeux exactement en face et précisément à 57 cm d'un écran d'ordinateur. Les sujets répondaient le plus rapidement et le plus précisément possible en appuyant sur l'un ou l'autre des 'boutons réponses' qu'ils tenaient dans chacune de leur main. S'ils estimaient que le caractère affiché était dans sa bonne orientation ils répondaient « oui » par un appui de la main droite et, inversement, ils répondaient « non » de la main gauche s'ils estimaient que le caractère présenté était l'image en miroir d'un caractère. Nous avons enregistré les réponses et mesuré les temps de réaction. Les stimuli mesuraient 1,5 cm de large sur 2 cm de haut. Les 40 stimuli (20 caractères + 20 images en miroirs) étaient mélangés et répétés 3 fois aléatoirement dans une même série de 120 essais. En conséquence, 60 réponses étaient données pour chaque police, c'est à dire pour chaque modalité d'apprentissage. Chaque stimulus était présenté pendant 400 ms avec 1600 ms d'intervalle inter-stimuli (croix de fixation).

Trois tests ont été effectués à 3 délais post-apprentissage : le 1^{er} (délai = 0) immédiatement à la suite de la dernière séance d'apprentissage ; le 2nd une semaine plus tard (délai = 1) et le 3^{ème} trois semaines après l'apprentissage (délai = 3).

2. Résultats

Les taux de reconnaissance correcte aux trois délais post-apprentissage et pour les deux modalités sont indiqués dans le tableau 11 et représentés sur la figure 31. On voit que les performances ne sont pas différentes au délai = 0 mais qu'elles commencent à se différencier légèrement après une semaine. Après trois semaines, les bonnes réponses chutent nettement pour les caractères appris au clavier alors que pour les caractères appris à la main, elles restent au même niveau.

sujet	délai = 0		délai = 1 semaine		délai = 3 semaines		délai 0 - délai 3 semaines	
	M	C	M	C	M	C	M	C
1	80,0	83,3	86,7	80,0	85,0	65,0	5,0	-18,3
2	91,7	85,0	88,3	76,7	90,0	63,3	-1,7	-21,7
3	78,3	88,3	88,3	88,3	73,3	75,0	-5,0	-13,3
4	81,7	76,7	68,3	83,3	83,3	81,7	1,7	5,0
5	90,0	91,7	95,0	93,3	90,0	81,7	0,0	-10,0
6	85,0	81,7	88,3	85,0	93,3	61,7	8,3	-20,0
Médiane	83,3	84,2	88,3	84,2	87,5	70,0	0,8	-15,8

Tableau 11. Valeurs des taux de réponses correctes (%) pour les six sujets.

M = manuscrit ; C = clavier

A cause du faible nombre de sujets, nous avons effectué des tests statistiques non paramétriques (test de Wilcoxon pour échantillons appariés) en vue de différencier les deux modalités. Ces tests ont été réalisés séparément pour chaque délai post apprentissage, sur les temps de réaction et les taux d'erreurs. Aucun des trois tests réalisés sur les temps de réaction n'a donné de valeur de p inférieure à 10 %. En revanche, dans les comparaisons des taux de réponses correctes, les tests ont montré une différence approchant la signification statistique, pour le troisième délai et en faveur de la modalité manuscrite ($T = 1.5$, $p < .06$).

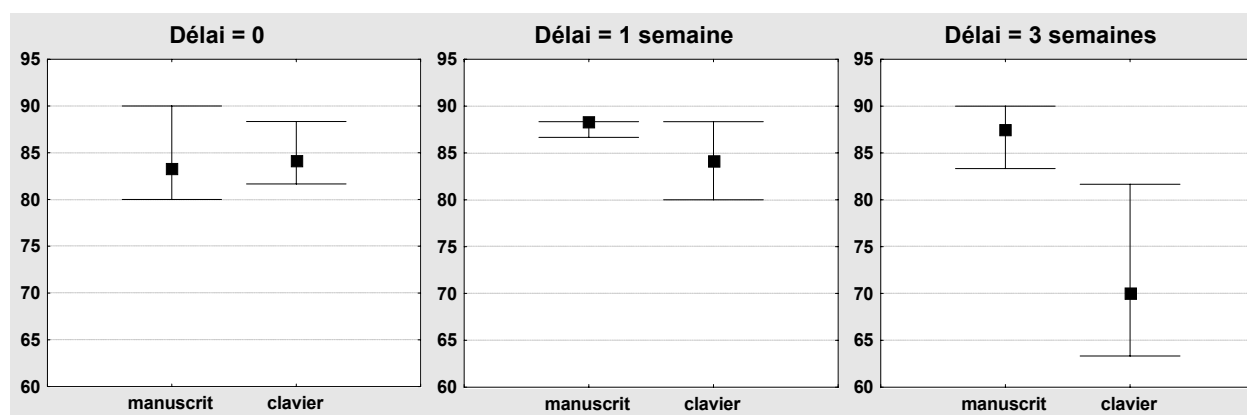


Figure 31. Taux de réponses correctes (%) en fonction de la modalité d'apprentissage, et pour les trois délais post-apprentissage

Les points représentent les valeurs médianes. Les moustaches représentent l'intervalle entre le premier et le troisième quartile.

Afin de mettre en évidence cet effet du délai, et parce que les tests non paramétriques ne permettent pas de tester directement des interactions de facteurs expérimentaux, nous avons calculé un score d'évolution des réponses dans le temps, en soustrayant simplement les taux de réponses correctes produits au troisième délai de ceux produits au premier délai, pour les deux modalités d'apprentissage (tableau 11, colonne de droite). Un score négatif indique de moins bonnes performances à 3 semaines, c'est à dire un oubli des caractères à long terme. On voit qu'alors que les scores pour les caractères appris à la main sont proches de zéro (pas d'oubli), les scores sont négatifs pour les caractères appris au clavier. On observe le même type d'évolution différentielle selon la modalité d'apprentissage entre 0 et 3 semaines chez 5 sujets sur les 6. Un test de Wilcoxon pour échantillons appariés réalisé sur ces scores montre une différence significative ($T = 1$, $p < .05$). Les caractères appris au clavier sont sujets à un oubli après 3 semaines, tandis que le taux de reconnaissance des caractères appris à la main reste remarquablement stable.

3. Discussion

Ces premiers résultats confirment largement ceux obtenus avec de jeunes enfants. Ce qui est frappant, c'est que l'effet du délai apparaît de la même manière chez des enfants ou des adultes malgré des conditions expérimentales, un matériel et des tests différents. Il conduit à un oubli plus rapide de l'orientation des caractères qui n'ont pas été tracés à la main. Lorsque

nous aurons davantage de données disponibles, une analyse par caractère nous permettra de déterminer si les réponses sont, comme celles des enfants, influencées par la complexité visuelle des caractères présentés.

La différence dans cet effet du délai entre les enfants (à une semaine) et les adultes (à trois semaines) suggère que la composante visuelle de la représentation, qui était la seule présente pour les caractères appris au clavier, était encore plus fragile chez les premiers. Cela peut être dû à des facteurs développementaux jouant sur les capacités mnésiques (Russo, 1995; Luciana & Nelson, 1998) mais aussi au fait que, pour des raisons évoquées plus haut, l'apprentissage a été moins long et intensif.

DISCUSSION

I. Résumé des principaux résultats obtenus, perspectives immédiates

Qu'apporte la motricité graphique à la représentation centrale de l'écrit ? Cette question a été abordée par une approche neurofonctionnelle et une approche comportementale, qui ont donné lieu à des résultats allant dans le même sens.

Les expériences en IRMf nous ont montré que la simple perception visuelle de lettres déclenchait l'activation d'une partie du cortex prémoteur. Un certain nombre d'arguments nous ont permis d'avancer l'idée que cette activation pouvait s'expliquer par l'évocation implicite des mouvements d'écriture correspondants.

Les expériences comportementales ont donné des résultats comparables chez des enfants d'âge préscolaire et chez des adultes. Elles ont globalement montré que la manière dont les sujets apprenaient à écrire les caractères avait des conséquences sur la manière dont ils les percevaient par la suite.

Ces résultats suggèrent la mise en jeu d'interactions perceptivo-motrices dans la perception de l'écrit, tant au niveau neural qu'au niveau comportemental. Ils sont en faveur de notre hypothèse de départ. S'ils sont encourageants, ils ne constituent qu'un point de départ et demandent évidemment à être confirmés et précisés. En particulier, il pourrait être objecté que, parce que nous avons adopté deux approches expérimentales extrêmement différentes, les résultats que nous obtenons, pourraient être la conséquence de deux processus totalement distincts. Naturellement, il est aujourd'hui impossible de conclure définitivement que, parce que nous apprenons mieux les lettres en les écrivant lorsque nous sommes enfants, notre cortex prémoteur s'active lorsque, adultes, nous regardons ces mêmes lettres, et que cela nous permet de ne pas les confondre avec leurs images en miroir. D'autres investigations sont absolument nécessaires avant d'affirmer que les deux manifestations d'interactions perceptivo-motrices mises en évidence sont le reflet d'un seul et même processus. Dans cette perspective, l'intégration des deux approches méthodologiques, que nous avons initiée avec la troisième expérience, constitue le prolongement le plus naturel de ce travail. Nous espérons que cette dernière étude nous permettra de mettre en correspondance directe les corrélats neuraux et les corrélats comportementaux.

Il serait également important de manipuler d'autres facteurs au cours des tests afin de cibler plus précisément le rôle fonctionnel du codage moteur des caractères. Nous avons par exemple évoqué la possibilité que ce dernier soit fonctionnellement pertinent lorsque le codage visuel ne suffit pas, soit parce qu'il est imprécis, soit parce qu'il est déficient. Dans ce cas, on pourrait faire l'hypothèse que si le stimulus visuel était dégradé (par exemple en le bruyant pour le rendre plus difficile à distinguer), le codage moteur serait spontanément plus activé. Cette possibilité nous paraît importante à considérer, non seulement pour son intérêt théorique, mais aussi pour ses implications notamment dans la rééducation de patients porteurs de lésions cérébrales (alexie, Bartolomeo et al., 2002; Seki et al., 1995).

Outre ces perspectives immédiates, les résultats obtenus amènent à discuter des mécanismes qui pourraient conduire à la mise en place des interactions au cours de l'apprentissage, et à faire des hypothèses sur la nature des représentations neurales concernées. Dans ce cadre, nous allons voir que ce travail pourrait être prolongé dans plusieurs directions importantes.

II. Un réseau multimodal pour coder l'identité des lettres

L'activation de la forme motrice des lettres dans une situation de perception passive, si elle est confirmée, indique que la représentation neurale de ces stimuli intègre une composante motrice. Des hypothèses peuvent être avancées concernant les mécanismes de mise en place de ces représentations au cours de l'apprentissage. En effet, deux théories existent dans la littérature, qui rendent compte de la représentation neurale des objets d'une part (Martin et al., 2000) et des mots d'autre part (Pulvermüller, 1999). Elles se fondent sur la notion d'assemblées de cellules distribuées sur l'ensemble du cortex (Hebb, 1958; Milner, 1996), et leurs principes généraux peuvent être appliqués à la problématique de la représentation centrale des lettres.

Nous avons déjà évoqué à plusieurs reprises le fait que la perception d'objets manipulables, parce que leur configuration spatiale est associée aux mouvements nécessaires pour les utiliser, génère au niveau cortical le même type d'activations que celles que nous avons décrites pour les lettres. Suite à ces observations et à d'autres résultats concernant d'autres catégories d'objets, Martin et ses collaborateurs ont développé un modèle sensori/moteur des représentations sémantiques. Selon ces auteurs, qui reprennent des idées plus anciennes de la

littérature neuropsychologique, la représentation d'un objet donné serait distribuée sur plusieurs régions du cortex. L'information relative aux attributs et aux traits qui définissent l'objet serait stockée dans les systèmes sensoriels et moteurs qui étaient actifs durant son apprentissage initial. Plus précisément, ce seraient les régions cérébrales impliquées dans l'analyse des traits les plus caractéristiques et discriminants de l'objet (couleur pour une pomme ou une orange, et mouvements nécessaires à l'utilisation pour une clef ou une paire de ciseaux) qui seraient sollicitées aussi bien pour l'acquisition de sa représentation que pour sa reconnaissance subséquente (Warrington & McCarthy, 1987). Ainsi, lorsque le mouvement est pertinent pour discriminer l'objet parmi d'autres physiquement ressemblants, et est systématiquement associé à sa configuration visuelle pendant l'apprentissage, il sera partie intégrante de sa représentation. Les lettres remplissent ces deux conditions.

Une conception similaire a également été proposée par Pulvermüller (1999) à propos de la représentation neurale des mots. Selon cet auteur, qui applique la théorie de Hebb (1958) au domaine linguistique, chaque mot serait représenté par une assemblée cellulaire distribuée topographiquement sur plusieurs régions du cortex et formant une seule et même unité fonctionnelle. Une assemblée donnée se formerait au cours de l'apprentissage, parce que les neurones sollicités sont coactivés systématiquement, cette coactivation renforçant les synapses. Deux des principes énoncés par Hebb et repris par Pulvermüller sont importants à retenir pour notre problématique :

- D'abord, si l'activation simultanée de plusieurs neurones ou groupes de neurones est causée par des inputs de différentes modalités sensorielles ou si elle est reliée à un output moteur, l'assemblée de neurones formée ne sera pas distribuée sur les mêmes régions du cortex. Cette vision est similaire à celle de la théorie sensori/motrice des représentations sémantiques décrite plus haut.
- Ensuite, lorsque les assemblées sont formées et stabilisées, si un évènement sensoriel externe vient stimuler une quantité suffisante des cellules constitutives, cette activation va s'étendre à l'assemblée entière (ignition), et se maintenir pendant une certaine durée (réverbération).

La notion de représentation par des assemblées de neurones implique donc une distribution spatiale particulière des activations liées à l'objet représenté, mais aussi une dynamique particulière de ces activations.

Ainsi, dans le cadre de la représentation des mots, la forme phonologique serait essentiellement représentée par une unité neurale distribuée dans la région péri-sylvienne, dans les cortex auditif, moteur et somato-sensoriel associés lors de l'écoute et de la prononciation du mot au cours de l'apprentissage initial. Lorsque le sens, acquis par l'activation de neurones impliqués dans les aspects perceptifs, moteurs ou émotionnels en relation avec le mot s'ajouterait à sa forme phonologique, il se créerait une « assemblée d'ordre supérieur » englobant à la fois la forme et la sémantique du mot (voir figure 32). Il a par exemple été démontré que le rappel de mots désignant des actions ou des objets associés à des actions active d'une part une partie de la région péri-sylvienne (gyrus frontal inférieur) et d'autre part une région prémotrice (Grabowski et al., 1998).

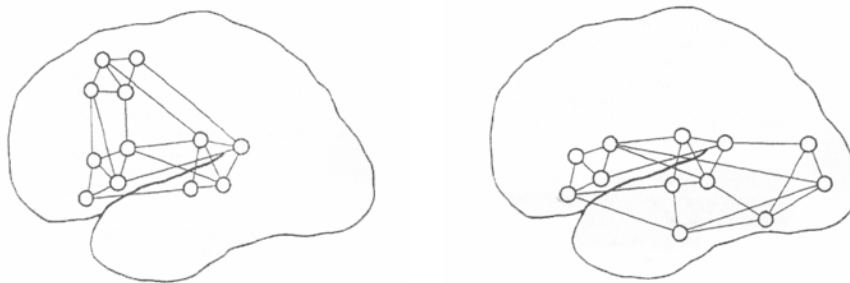


Figure 32. Assemblées de cellules représentant des mots, selon Pulvermüller (1999)

A gauche, l'assemblée représente un mot se référant à une action (par exemple le verbe « lancer »). Les neurones composant l'assemblée sont distribués sur la région péri-sylvienne (forme phonologique) et autour du cortex moteur, dans les régions normalement impliquées dans l'exécution de cette action.

A droite, l'assemblée représente un mot se référant à un objet défini par ses qualités visuelles (par exemple un nom d'animal). L'assemblée est distribuée sur la même région péri-sylvienne, ainsi que sur les régions occipitales et temporales normalement impliquées dans l'analyse visuelle de cet objet.

Si l'on applique cette conception à notre problématique, il se pourrait que parce que la forme visuelle de la lettre et le mouvement d'écriture sont appris simultanément, il se crée une assemblée de cellules intégrant les deux composantes et distribuée à la fois sur des aires visuelles et des aires motrices.

Si la représentation des lettres repose effectivement sur un réseau multimodal, l'une des lacunes possibles de notre approche est que nous n'avons pas pris en compte tous les modes de codage existants. En effet, si les lettres ont une forme visuelle et graphomotrice bien

particulière, elles sont aussi associées fortement à un son, et ceci très précocement dans l'apprentissage. En outre, ce son lui-même peut être produit par une configuration bien particulière de l'appareil phonatoire, c'est à dire qu'il a aussi sa propre composante motrice. La position théorique qui a consisté à ne pas tenir compte de la représentation phonologique des lettres se justifiait, comme nous l'avons déjà discuté, par le fait que d'une part nous nous intéressions à des aspects spatiaux du traitement visuel, et que d'autre part, des résultats expérimentaux indiquent que si la tâche ne le requiert pas explicitement, la forme phonologique des lettres n'est pas évoquée lors de leur traitement visuel (Arguin & Bub, 1995; Bowers et al., 1998; Hellige & Webster, 1979; Niederbuhl & Springer, 1979; Mycroft et al., 2002). Nos résultats en IRMf n'ont pas non plus apporté d'indices concluants dans le sens d'une activation automatique de la phonologie dans la situation de perception passive. Cela suggère que les formes « visuo-graphémique » et « auditivo-articulatoire » pourraient être codées par deux assemblées distinctes entretenant néanmoins des connexions privilégiées, et susceptibles, si nécessaire, de former une assemblée d'ordre supérieur (voir figure 33). Les interactions entre codages visuel, graphique, auditif, et articulatoire mériteraient d'être systématiquement étudiées selon le contexte et la tâche à réaliser.

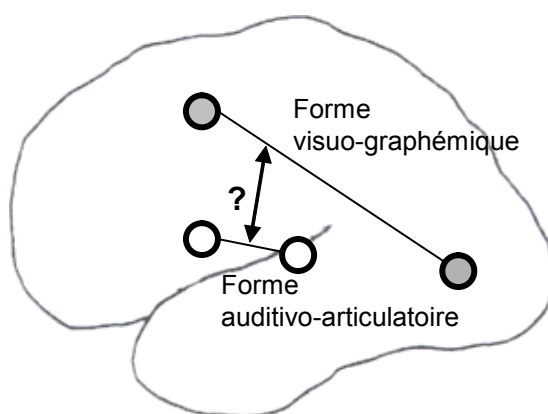


Figure 33. Représentation cérébrale possible des lettres, par deux assemblées de cellules

La forme visuelle de la lettre serait représentée par une assemblée distribuée sur le cortex visuel et le cortex moteur de la main. De la même manière, la forme phonologique pourrait être représentée par une assemblée distribuée sur le cortex auditif et le cortex moteur codant les mouvements d'articulation. Les interactions possibles entre les deux assemblées sont mal élucidées.

Dans le même ordre d'idées, nous avons également volontairement négligé le codage kinesthésique et somato-sensoriel, car nous avons considéré que, lorsque l'écriture s'est automatisée, les informations proprioceptives ne semblent pas cruciales pour le contrôle et l'exécution des mouvements (Paillard, 1990; Smyth & Silvers, 1987; Teasdale et al., 1993). Cependant, l'importance des retours proprioceptifs pour la mise en correspondance systématique des entrées sensorielles avec des actions, c'est à dire au cours de la mise en place initiale des interactions perceptivo-motrices, est soulignée par Paillard (1999). En outre, la proprioception est sans nul doute fondamentale lorsque les enfants apprennent à écrire, et sont en train de mémoriser les représentations motrices propres à chaque lettre (Zesiger, 1995) p184, 187). Enfin, nous possédons très certainement une représentation proprioceptive, même sommaire, des lettres. En effet, par vibration des tendons des muscles impliqués dans les mouvements du poignet, vibration qui stimule les fuseaux neuromusculaires, on peut faire percevoir un mouvement graphique et, par suite, discriminer la forme géométrique virtuellement dessinée (Roll & Gilhodes, 1995). La même technique permet d'identifier des caractères isolés, voire des mots très courts constitués de une à trois lettres (Gilhodes, communication personnelle).

Dans tous les cas, quelle que soit la position théorique adoptée et les paramètres pris en compte, il nous paraît pertinent de considérer le caractère dynamique des réseaux mis en jeu. Comme nous l'avons évoqué plus haut, le signal BOLD, qui dépend de changements métaboliques, ne reflète qu'une partie du fonctionnement cérébral. Il est essentiel de pouvoir combiner l'IRMf avec des techniques dotées d'une résolution temporelle plus précise, comme la MEG ou l'EEG. L'étude des composantes temporelles des activations pourra ainsi nous renseigner plus précisément sur la nature des représentations et des processus de traitement en jeu (Hari et al., 2000), et donc finalement sur la fonction du codage moteur des caractères. La présence d'activités électromagnétiques oscillatoires synchronisées dans des gammes de fréquences hautes (bande gamma) au cours de la perception est notamment interprétée comme la manifestation électrophysiologique des phénomènes de généralisation perceptive décrits par Hebb (Pulvermüller, 1999). Les latences d'apparition de ces activités, leurs distributions topographiques à la surface du scalp en fonction du stimulus, sont des indices pertinents des processus de traitement sous-jacents (Bertrand & Tallon-Baudry, 2000).

III. Interactions perceptivo-motrices : stratégie générale et spécificité

Tout au long de notre progression dans ce travail, nous avons pu nous rendre compte que les fonctions motrices du système nerveux sont en fait sollicitées dans de nombreuses activités perceptives et même cognitives. Nous avons évoqué le rôle des mouvements implicites des yeux dans des phénomènes attentionnels, le rôle des processus de verbalisation implicite dans la mémoire de travail, le rôle des mouvements implicites de la main dans l'analyse visuelle d'objets, la rotation mentale d'objets et plus largement dans des tâches visuo-spatiales, etc... Parmi les structures cérébrales supposées participer à ces phénomènes, le cortex prémoteur, en particulier, est de plus en plus souvent impliqué dans des tâches variées, n'ayant pas directement de composantes motrices. Selon Shubotz et von Cramon (2001; 2002), le cortex prémoteur serait systématiquement recruté lorsque nous sommes dans une situation de perception d'événements séquentiels et que nous devons prédire la suite de la séquence, ou juger si un événement en est déviant. Dans ce cadre, différentes subdivisions seraient impliquées dans l'analyse de différentes dimensions (temporelle, spatiale, configuration visuelle) du stimulus sensoriel. Certains auteurs confèrent aux aires prémotrices un rôle cognitif (Hanakawa et al., 2002; Rizzolatti et al., 2002). Dans une étude très précise des propriétés de réponse du cortex prémoteur dorsal dans différentes tâches requérant des opérations mentales verbales, spatiales ou numériques, Hanakawa et coll. (2002) concluent que cette structure est importante dans les processus nécessitant l'association arbitraire d'indices symboliques avec une réponse. Il y a finalement de quoi s'interroger sur la spécificité des effets que nous avons observés au niveau neural pendant la perception visuelle de lettres, et plus généralement sur la spécificité des activations motrices rapportées dans des situations perceptives ...

En fait, l'ensemble de ces résultats expérimentaux suggère que la « lecture motrice » des stimulations sensorielles reçues serait une stratégie générale, appliquée dans de nombreuses situations perceptives. De plus en plus d'évidences expérimentales s'accumulent, suggérant que le système moteur aurait un rôle particulièrement crucial dans notre compréhension du monde extérieur, en nous permettant d'établir des hypothèses sur les situations et les objets rencontrés. Cette capacité de simulation constante nous permettrait en particulier d'anticiper le déroulement de certains événements, ou leurs conséquences, et d'adapter efficacement

notre comportement. (Berthoz, 1997; Gallese, 2000; Jeannerod, 2001; Paillard, 1999). Elle aurait ses fondements dans les toutes premières interactions que l'enfant développe avec son environnement, lors de la mise en correspondance des stimulations sensorielles reçues avec ses propres mouvements. (Paillard, 1971; Piaget, 1948). Les représentations motrices ne seraient donc pas seulement activées lorsque nous reconnaissons certains objets familiers, elles le seraient aussi lorsque nous faisons des hypothèses sur les propriétés d'objets que nous ne connaissons pas, et qui nous sont décrits par la vision (voire par d'autres modalités sensorielles). A des processus de reconnaissance spécifiques passant par la motricité, parce que celle-ci est intégrée à la représentation de l'objet en mémoire, s'ajouterait une stratégie générale et aspécifique, qui consisterait à appliquer spontanément à l'objet rencontré le ou les mouvements potentiels qui lui seraient le mieux adaptés (Gallese, 2000). Quelle est la part des deux processus dans le traitement visuel des formes graphiques ? Nous avons vu qu'en plus des activations prémotrices spécifiques et dont nous avons établi qu'elles étaient dues à l'activation des représentations graphiques, la perception des lettres pouvait évoquer, de même que celle des pseudolettres, des activations motrices plus ventrales (chez les gauchers et certains droitiers). Nous avons qualifié ces activations d'aspécifiques et les avons reliées à des traitements visuospatiaux. Mais quel est leur rôle exact dans les processus de reconnaissance ? Seraient-elles impliquées dans la catégorisation des formes rencontrées ? Encore une fois, pour aborder efficacement ce problème, s'impose la nécessité de se poser plus précisément la question « comment ? » en plus de la question « où ? », en utilisant les outils comportementaux et électrophysiologiques appropriés.

IV. Evocation automatique, imagerie mentale et exécution réelle des mouvements

Les effets obtenus dans les différentes expériences réalisées sont une preuve supplémentaire de la possibilité pour des représentations motrices d'être mobilisées sans exécution réelle. Trois niveaux peuvent être considérés : celui de l'exécution, celui de l'imagerie et celui de l'évocation. Dans les études reportant des activations de régions cérébrales motrices, on peut souvent lire : « Nous observons l'activation de telle région motrice dans telle activité perceptive ou cognitive. Des activations similaires ont été décrites dans telle étude, durant l'imagerie mentale de tel type de mouvements. » Le raisonnement implicite général (que nous avons également adopté) est que les régions qui codent l'exécution des mouvements

participent de la même manière à leur imagination (Jeannerod, 1994), mais aussi et surtout à leur évocation automatique (Jeannerod, 2001). Il nous semble que ce raisonnement pourrait être questionné : on pourrait se demander si ce sont exactement les mêmes substrats neuraux, et/ou les mêmes phénomènes dynamiques qui sont en jeu lorsqu'un mouvement d'écriture est réellement produit ou lorsqu'il est activé implicitement durant la perception visuelle de lettres.

De nombreuses études se sont intéressées aux similitudes mais aussi aux différences dans les régions cérébrales activées par l'imagerie mentale et par l'exécution de mouvements (Decety et al., 1994; Gerardin et al., 2000; Hanakawa et al., 2003). Certaines montrent que si de nombreuses aires fronto-pariétales exhibent une activité équivalente dans les deux cas, il existe aussi des aires qui sont plus « exécutives », et d'autres (dont le cortex prémoteur), plus « imaginatives » (Gerardin et al., 2000; Hanakawa et al., 2003). En revanche, si beaucoup d'études, dont la nôtre, se sont centrées sur les bases neurales communes à l'exécution et l'évocation (voir par exemple Grèzes et al., 2003; Hanakawa et al., 2002) de divers types de mouvements, très peu se sont penchées sur les différences anatomiques mais aussi fonctionnelles entre les deux états (voir cependant Boussaoud, 2001). S'agit-il simplement de différences en termes de niveau d'activation des représentations motrices dans les deux cas ? S'agit-il de différences plus profondes ?

V. Implications pour les troubles du développement de l'écrit : l'hypothèse motrice de la dyslexie

Si nous avons évoqué le rôle possible de la motricité pour suppléer à la vision lorsque celle-ci est en difficulté, le problème pourrait être inversé. On pourrait se demander si lorsque c'est le codage moteur qui est déficient, la reconnaissance visuelle est altérée de manière significative. L'étude neuropsychologique d'Anderson et coll. (1990), dont nous avons déjà parlé, semble constituer un argument dans ce sens.

Dans la discussion des expériences comportementales, nous avons, à propos de l'absence de résultats chez les enfants les plus jeunes, évoqué la possibilité d'une sortie motrice mal maîtrisée, et non informative. Nous avons noté que la motricité n'était pas non plus délétère,

puisque les « jeunes-manuscrit » n’obtenaient pas de résultats plus mauvais que les « jeunes-clavier ». Par contre, nos résultats suggèrent que lorsque le codage moteur est bruité, cela équivaut à son absence, et potentiellement à un manque de précision dans la reconnaissance de certaines lettres (particulièrement les plus complexes). Ces résultats évoquent assez spontanément les implications possibles pour l’étude des troubles de l’apprentissage de l’écrit, les dyslexies et les dysgraphies, ainsi que leurs relations.

La dyslexie, par l’enjeu de société qu’elle représente, a récemment été l’objet de nombreuses études fondées sur des hypothèses physiopathologiques variées (voir Habib, 2000; Ramus, 2003 pour revues). Certaines d’entre elles ont démontré la présence de troubles discrets de la coordination des gestes, permettant de parler de dyspraxie, chez une grande proportion des dyslexiques (Fawcett & Nicolson, 1999; Velay et al., 2002). L’étude de Nicolson et coll. (1999), en imagerie cérébrale, indique que les adultes dyslexiques auraient une activité cérébelleuse différente de celle des adultes témoins. L’association de troubles d’ordre strictement moteur au trouble de la lecture qui caractérise la dyslexie a donné lieu à une hypothèse selon laquelle une des causes neurologiques possibles pour expliquer la dyslexie serait un trouble d’origine motrice (Nicolson et al., 2001, voir figure 34).

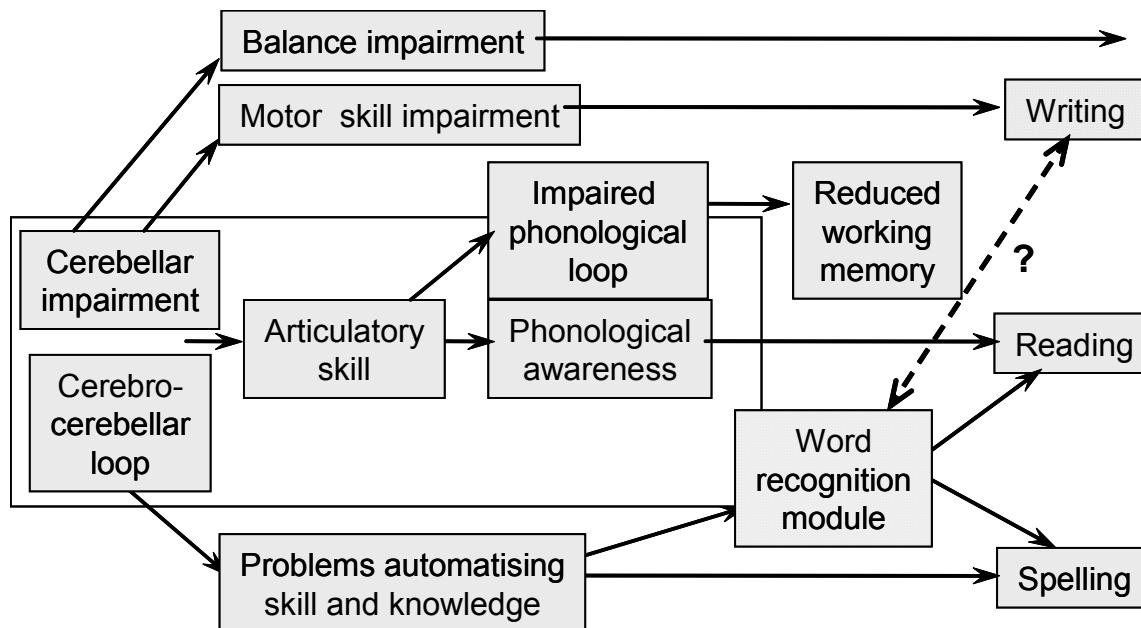


Figure 34. Chaîne causale postulée par Nicolson et coll. (2001) pour expliquer les troubles de la lecture d'origine cérébelleuse

Pour ces auteurs, les troubles moteurs se répercutant sur l'écriture sont collatéraux, la dysfonction cérébelleuse affectant surtout la phonologie. Est-il possible qu'un déficit de la motricité graphique influence directement une partie des processus de reconnaissance des mots ?

Par ailleurs, et cela nous renvoie à nos propres résultats, des difficultés dans la discrimination des lettres spatialement ambiguës ont été mises en évidence chez les « mauvais lecteurs » (Liberman et al., 1971; Terepocki et al., 2002). Ces difficultés pourraient-elles être consécutives à un problème moteur, une difficulté à former ces lettres ou seulement à utiliser la représentation sensorimotrice qui est associée à leur représentation visuelle ? Il faut cependant souligner que peu d'études ont réellement démontré des déficits dans les aspects spatiaux de la reconnaissance de lettres dans la dyslexie. En fait, le traitement visuel de lettres par les sujets dyslexiques reste largement méconnu, et il est impossible de dire s'il est ou non déficitaire. Bref, la confusion du 'b' et du 'd' par les dyslexiques reste à l'heure actuelle un mythe, bien ancré dans les esprits, mais non confirmé formellement par les cliniciens (Habib, communication personnelle). Des études sont actuellement en cours dans l'équipe pour vérifier ce point, ainsi que les liens éventuels entre représentation du mouvement d'écriture et reconnaissance visuelle de lettres dans cette population. Dans ce cadre il est important de pouvoir caractériser d'éventuels troubles de la motricité graphique, afin de les corrélérer avec des scores dans divers tests de reconnaissance de lettres.

VI. Autres symboles : les chiffres et les notes de musique

Pour terminer, nous il nous paraît important de souligner que la contribution du mouvement n'est probablement pas limitée à l'apprentissage des lettres. Il existe deux autres exemples particulièrement illustratifs de la contribution possible de la motricité dans des apprentissages fondamentaux : il s'agit de l'apprentissage de l'arithmétique et de celui de la musique.

Si vous demandez son âge à un petit enfant, il répondra sans doute « J'ai comme ça ! », en même temps qu'il vous montrera fièrement les doigts de sa main qui correspondent. A des âges si précoces, la notion même de chiffre est confondue avec le nombre de doigts de la main. Lorsque l'enfant n'est pas encore capable de compter mentalement, il s'appuie spontanément sur la référence externe que sont ses doigts (Barrouillet & Camos, 2003; Simon, 1999). Les performances à des tests de gnosie digitale (dénomination, discrimination des doigts...) sont d'ailleurs l'un des meilleurs prédicteurs de la réussite en arithmétique chez des enfants de 5-6 ans (Fayol et al., 1998). Ce qui est encore plus intéressant, c'est que cette stratégie systématique appliquée au cours de l'apprentissage va persister à l'âge adulte, de manière implicite. Ainsi, l'implication des sillons intrapariétaux et du gyrus précentral gauche a été mise en évidence à plusieurs reprises dans des tâches de calcul, de rappel de faits arithmétiques et de comparaison de magnitudes (Pesenti et al., 2000; Zago et al., 2001). Ces activations ont été interprétées comme une trace développementale des stratégies de comptage sur les doigts (Butterworth, 1999; Pesenti et al., 2000; Simon, 1999; Zago et al., 2001). Notons que, de manière intéressante, la perception visuelle de chiffres en elle-même ne semble pas évoquer d'activations dans des régions cérébrales motrices (Pesenti et al., 2000). Les composantes cognitives de la « pensée numérique » sont sans doute extrêmement complexes. Il apparaît néanmoins que nos habiletés numériques reposent en partie sur un réseau impliqué dans les mouvements des doigts, acquis au cours de l'apprentissage. Dans ce réseau, le cortex pariétal gauche semble jouer un rôle prédominant, comme le souligne Butterworth (1999), et comme l'atteste l'existence du « syndrome de Gerstmann » déficit associant agnosie digitale, acalculie, agraphie et désorientation gauche-droite, et apparaissant suite à une lésion pariétale gauche, au niveau du gyrus angulaire ou supramarginal (Gerstmann, 1957; Mayer et al., 1999).

Les mouvements, en particulier des doigts, pourraient également avoir une influence très prégnante sur la représentation centrale de la musique, chez les sujets experts. D'abord, sans doute participent-ils à la perception des instruments en tant qu'objets : il est probable, étant donné tout ce que nous avons déjà exposé concernant la représentation des objets manipulables, que le joueur de harpe ou de cornemuse ne possède pas la même représentation de son instrument qu'un sujet naïf. Nous avons cité à ce propos en introduction le cas de F.B. (Sirigu et al., 1991), patient agnosique présentant des troubles très sévères de la reconnaissance visuelle et de l'évocation mentale d'objets, mais qui avait gardé en mémoire une image parfaite de la forme de la guitare, instrument qu'il pratiquait, comme le montre le dessin reproduit en figure 4 (Introduction). Mais surtout, les mouvements de manipulation des instruments pourraient participer directement à la représentation de la musique par les associations auditivo-motrices qu'ils permettent de créer au cours de l'apprentissage. Comme le soulignent Drake et Rochez (2003), on sait encore très peu de choses sur les processus d'apprentissage en jeu et sur les relations entre l'acquisition de la musique et le développement d'autres compétences perceptives, ou motrices chez les enfants concernés. Chez l'adulte, les conséquences de la connaissance de la musique sur les structures neurales sous-jacentes sont un peu mieux élucidées, car les sujets musiciens, étant données la longueur, la spécificité et l'intensité de leur pratique, sont un modèle particulièrement intéressant pour l'investigation des mécanismes de plasticité cérébrale. Il a par exemple été montré grâce à la TMS que l'entraînement intensif à un instrument modifie la représentation corticale des muscles impliqués (Pascual-Leone, 2003). En parallèle, des phénomènes plastiques modèlent chez les musiciens les circuits cérébraux qui traitent les sons (Rauschecker, 2003). Encore une fois pourtant, il est surprenant de remarquer que le traitement de la musique est considéré soit du point de vue perceptif, soit du point de vue moteur, mais que très peu d'auteurs ont tenté de tisser des liens entre les deux aspects, malgré l'association évidente entre le geste et le son produit au cours de l'apprentissage. Intuitivement, on peut facilement imaginer qu'un pianiste ne traitera pas de la même manière un morceau joué au piano qu'un chanteur, même si leur expertise musicale est comparable. C'est effectivement ce qu'ont démontré Haueisen et Knösche (2001) dans une expérience en MEG. Au plan cérébral, la seule différence entre des pianistes et des chanteurs qui entendent des mélodies familières jouées au piano est une forte activation du cortex moteur chez les premiers. Les auteurs ont même pu démontrer une ségrégation somatotopique des activations motrices chez les pianistes, selon que les notes entendues étaient normalement jouées avec le pouce ou le petit doigt. Des effets de même

nature apparaissent après des périodes d'entraînement relativement courtes (quelques semaines) chez des sujets adultes initialement non-musiciens (Bangert et al., 2001).

Les lettres, les chiffres et les notes sont des codes symboliques omniprésents dans notre vie quotidienne. Ils constituent les unités de base sur lesquelles sont fondés trois domaines de la cognition humaine, qui mettent en jeu des traitements extrêmement complexes : le langage écrit, l'arithmétique et la musique. Ce qui est fascinant, c'est que ces trois codes sont naturellement acquis à travers des mouvements, mouvements de natures bien distinctes cependant. La comparaison des traitements de « bas niveau » reposant sur ces trois types de symboles, en se focalisant sur le rôle joué par les connaissances motrices spécifiques à chacun, présenterait un intérêt certain, tant sur le plan théorique que sur le plan des problèmes pédagogiques posés. On peut d'ailleurs remarquer que la question des nouvelles technologies entraînant une modification du rôle de la motricité dans les apprentissages se pose aussi pour l'arithmétique et la musique (calculatrices, logiciels de dessin, musique électronique...)

CONCLUSION : NOTRE MANIERE D'ECRIRE INFLUENCE T- ELLE NOTRE MANIERE DE LIRE ?

L'ensemble des résultats présentés suggère que les mouvements d'écriture participent à la mémorisation, à la représentation, et à la reconnaissance visuelle des caractères. Nous ne pouvons affirmer toutefois que cela aurait un impact sur la lecture à proprement parler, quand il s'agit de percevoir et reconnaître des mots et non plus des lettres isolées. Néanmoins, s'il est définitivement établi que la reconnaissance des lettres est le premier des processus cognitifs qui se produisent pendant la lecture experte, il se pourrait que la façon dont les enfants apprennent à écrire interfère avec leur aptitude à la lecture. Doit-on pour autant rejeter définitivement l'ordinateur pour apprendre l'écrit ? Il est probablement trop tôt pour l'affirmer. En effet, si l'écriture manuscrite enrichit la représentation des caractères et facilite leur reconnaissance chez la majorité des enfants, elle pourrait produire l'effet inverse chez ceux qui, pour des raisons diverses, ont des difficultés à effectuer les mouvements fins et précis qu'elle impose. Dans ce cas, l'usage du clavier, beaucoup plus simple au plan moteur, associé au côté ludique de l'ordinateur, pourrait constituer « un tremplin » pour le passage à l'écriture manuscrite.

En nous affranchissant du concret, en libérant notre mémoire, les nouvelles technologies nous amènent sans doute vers de nouveaux modes de pensée que nous devons inventer. Seront-ils moins bons, meilleurs ? Seul le temps nous le dira. Ce qui est évident, c'est qu'il est essentiel d'être attentif à ces évolutions qui sont progressives, mais certainement plus rapides qu'on ne se l'imagine. Il y a quatre ans, lorsque ce travail a débuté, j'ai pu être témoin de certaines scènes dans lesquelles mon directeur, Jean Luc Velay, posait simplement la question : « et si l'on apprenait directement aux enfants à écrire sur un ordinateur ? ». Cela provoquait souvent des réactions vives, et parfois ironiques, de la part de son interlocuteur. Aujourd'hui cette question ne surprend plus personne.

REFERENCES

- Adams,M.J. (1979). Models of word recognition. *Cognitive Psychology*, 11, 133-167.
- Adams,M.J. (1990). *Beginning to read: thinking and learning about print*. Cambridge, MA: MIT press.
- Aimard,G., Devic,M., Lebel,M., Trouillas,P., & Boisson,D. (1975). Agraphie pure (dynamique?) d'origine frontale: a propos d'une observation. *Revue de Neurologie (Paris)*, 131(7), 505-512.
- Alivisatos,B. & Petrides,M. (1997). Functional activation of the human brain during mental rotation. *Neuropsychologia*, 35(2), 111-118.
- Amunts,K., Jäncke,L., Mohlberg,H., Steinmetz,H., & Zilles,K. (2000). Interhemispheric asymmetry of the human motor cortex related to handedness and gender. *Neuropsychologia*, 38, 304-312.
- Andersen,R.A., Snyder,L.H., Bradley,D.C., & Xing,J. (1997). Multimodal representation of space in the posterior parietal cortex and its use in planning movements. *Annual Review of Neurosciences*, 20, 303-330.
- Anderson,S.W., Damasio,A.R., & Damasio,H. (1990). Troubled letters but not numbers: domain specific cognitive impairments following focal damage in frontal cortex. *Brain*, 113, 749-766.
- Anderson,S.W., Saver,J., Tranel,D., & Damasio,H. (1993). Acquired agraphias caused by focal brain damage. *Acta Psychologica*, 82(1-3), 193-210.
- Anis,J. (1998). *Texte et ordinateur: l'écriture réinventée?* Paris, Bruxelles: De Boeck Université.
- Arbib,M.A. (1981). Perceptual structures and distributed motor control. In V.B. Brooks (Ed.), *Handbook of Physiology, section 1 : The nervous system. Vol II : Motor control, part 2* (pp. 1416). Bethesda, American Physiological Society.
- Arguin,M. & Bub,D. (1995). Priming and response selection processes in letter classification and identification tasks. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21(5), 1199-1219.
- Arguin,M. & Bub,D.N. (1993). Single-character processing in a case of pure alexia. *Neuropsychologia*, 31(5), 435-458.
- Babcock,M.K. & Freyd,J.J. (1988). Perception of dynamic information in static handwritten forms. *The American Journal of Psychology*, 101(1), 111-130.
- Bangert,M., Haeusler,U., & Altenmüller,E. (2001). On practice: how the brain connects piano keys and piano sounds. *Annals of New York Academy of Sciences*, 930, 425-428.
- Barrouillet,P. & Camos,V. (2003). Savoirs, savoir-faire arithmétiques et leurs déficiences. In M.Kail & M.Fayol (Eds.), *Les sciences cognitives et l'école* (pp. 307-351). Paris: PUF.
- Bartolomeo,P., Bachoud-Lévi,A.-C., Chokron,S., & Degos,J.-D. (2002). Visually- and motor-based knowledge of letters: evidence from a pure alexic patient. *Neuropsychologia*, 40(8), 1363-1371.
- Behrmann,M., Plaut,D.C., & Nelson,J. (1998). A literature review and new data supporting an interactive account of letter by letter reading. *Cognitive Neuropsychology*, 15(1/2), 7-51.
- Benoit-Dubrocard,S. & Touche,M.E. (1993). Letters as spatial-oriented shapes and/or graphemic signs: a developmental study of left- and right-handed girls during the period of learning to read. *Brain and Language*, 44, 385-399.
- Bergson,H. (1939). *Matière et mémoire*. Paris: Quadrige / PUF.
- Bernstein,N. (1967). *The coordination and regulation of movements*. New York: Pergamon press.

- Bertenthal,B.I., Proffitt,D.R., Spetner,N.B., & Thomas,M.A. (1985). The development of infant sensitivity to biomechanical motions. *Child Development*, 56(3), 531-543.
- Berthoz,A. (1997). *Le sens du mouvement*. Paris: Odile Jacob.
- Bertrand,O. & Tallon-Baudry,C. (2000). Oscillatory gamma activity in humans: a possible role for object representation. *International Journal of Psychophysiology*, 38, 211-223.
- Blakemore,S.J. & Decety,J. (2001). From the perception of action to the understanding of intention. *Nature Reviews Neuroscience*, 2(8), 561-567.
- Blakemore,S.J. & Frith,C.D. (2003). Self-awareness and action. *Current Opinion in Neurobiology*, 13, 219-224.
- Boussaoud,D. (2001). Attention versus intention in the primate premotor cortex. *NeuroImage*, 14(1 Pt 2), S40-S45.
- Bowers,J.S., Vigliocco,G., & Haan,R. (1998). Orthographic, phonological, and articulatory contributions to masked letter and word priming. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24(6), 1705-1719.
- Brett,M., Anton,J.L., Valbregue,R., & Poline,J.B. (2002a). Region of interest analysis using an SPM toolbox. Presented at the 8th International Conference on Functional Mapping of the Human Brain, June 2-6, 2002, Sendai, Japan. Available on CD-Rom in *NeuroImage*, 16(2).
- Brett,M., Johnsrude,I.S., & Owen,A.M. (2002b). The problem of functional localization in the human brain. *Nature Reviews Neuroscience*, 3, 243-249.
- Brunswick,N., McCrory,E., Price,C.J., Frith,C.D., & Frith,U. (1999). Explicit and implicit processing of words and pseudowords by adult developmental dyslexics: A search for Wernicke's Wortschatz? *Brain*, 122(Pt 10), 1901-1917.
- Buccino,G., Binkofski,F., Fink,G.R., Fadiga,L., Fogassi,L., Gallese,V., Seitz,R.J., Zilles,K., & Rizzolatti,G. (2001). Action observation activates premotor and parietal areas in a somatotopic manner: an fMRI study. *European Journal of Neurosciences*, 13, 400-404.
- Butterworth,B. (1999). A head for figures. *Science*, 284, 928-929.
- Caramazza,A. & Miceli,G. (1990). The structure of graphemic representations. *Cognition*, 37, 243-297.
- Castiello,U. & Stelmach,G.E. (1993). Generalized representation of handwriting: Evidence of effector independence. *Acta Psychologica*, 82(1-3), 53-68.
- Chao,L.L. & Martin,A. (2000). Representation of manipulable man-made objects in the dorsal stream. *NeuroImage*, 12, 478-484.
- Cochran-Smith,M. (1991). Word processing and writing in elementary classrooms: A critical review of related literature. *Review of Educational Research*, 61, 107-155.
- Cohen,G. (1972). Hemispheric differences in a letter classification task. *Perception and Psychophysics*, 11(2), 139-142.
- Cohen,L., Dehaene,S., Naccache,L., Lehericy,S., Dehaene-Lambertz,S., Henaff,M.A., & Michel,F. (2000). The visual word form area: Spatial and temporal characterization of an initial stage of reading in normal subjects and posterior split-brain patients. *Brain*, 123, 291-307.
- Coltheart,M., Rastle,K., Perry,C., Langdon,R., & Ziegler,J. (2001). DRC: a dual route cascaded model of visual word recognition and reading aloud. *Psychological Review*, 108(1), 204-256.
- Corbetta,M. & Shulman,G.L. (2002). Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain. *Nature Reviews Neuroscience*, 3, 201-215.

- Courrieu, P. & De Falco, S. (1989). Segmental vs. dynamic analysis of letter shape by preschool children. *Cahiers de Psychologie Cognitive*, 9(2), 189-198.
- Crary, M.A. & Heilman, K.M. (1988). Letter imagery deficits in a case of pure apraxic agraphia. *Brain and Language*, 34, 147-156.
- Cunningham, A.E. & Stanovich, K.E. (1990). Early Spelling Acquisition: Writing Beats the Computer. *Journal of Educational Psychology*, 82(1), 159-162.
- Damasio, A.R. & Damasio, H. (1983). The anatomic basis of pure alexia. *Neurology*, 33(12), 1573-1583.
- De'Sperati, C. & Viviani, P. (1997). The relationship between curvature and velocity in two-dimensional smooth pursuit eye movements. *The Journal of Neuroscience*, 17(10), 3932-3945.
- De Ajuriaguerra, J., Auzias, M., & Denner, A. (1979). *L'écriture de l'enfant: I. L'évolution de l'écriture et ses difficultés*. Paris: Delachaux et Niestlé.
- Decety, J., Perani, D., Jeannerod, M., Bettinardi, V., Tadary, B., Woods, R., Mazziotta, J.C., & Fazio, F. (1994). Mapping motor representations with PET. *Nature*, 371, 600-602.
- Deiber, M.P., Honda, M., Ibanez, V., Sadato, N., & Hallett, M. (1999). Mesial motor areas in self-initiated versus externally triggered movements examined with fMRI: effect of movement type and rate. *Journal of Neurophysiology*, 81, 3065-3077.
- Del Grosso Destreri, N., Farina, E., Alberoni, M., Pomati, S., Nichelli, P., & Mariani, C. (2000). Selective uppercase dysgraphia with loss of visual imagery of letter forms: a window on the organization of graphomotor patterns. *Brain and Language*, 71(3), 353-372.
- Déjerine, J. (1892). Contribution à l'étude anatomo-pathologique et clinique des différentes variétés de cécité verbale. *Mémoires de la Société de Biologie*, 4, 61-90.
- Dogil, G., Ackermann, H., Grodd, W., Haider, H., Kamp, H., Mayer, J., Riecker, A., & Wildgruber, D. (2002). The speaking brain: a tutorial introduction to fMRI experiments in the production of speech, prosody and syntax. *Journal of Neurolinguistics*, 15, 59-90.
- Dong, Y., Fukuyama, H., Honda, M., Okada, T., Hanakawa, T., Nakamura, K., Nagahama, Y., Nagamine, T., Konishi, J., & Shibasaki, H. (2000). Essential role of the right superior parietal cortex in Japanese kana mirror reading: An fMRI study. *Brain*, 123 (Pt 4), 790-799.
- Doyon, J., Penhune, V., & Ungerleider, L.G. (2003). Distinct contribution of the cortico-striatal and cortico-cerebellar systems to motor skill learning. *Neuropsychologia*, 41, 252-262.
- Drake, C. & Rochez, C. (2003). Développement et apprentissage des activités et perceptions musicales. In M. Kail & M. Fayol (Eds.), *Les sciences cognitives et l'école* (pp. 443-479). Paris: PUF.
- Dronkers, N.F. (1996). A new brain region for coordinating speech production. *Nature*, 384, 159-161.
- Duvernoy, H.M. (1999). *The human brain: surface, blood supply, and three-dimensional sectional anatomy*. Wien, New York: Springer.
- Eimas, P.D., Siqueland, E.R., Jusczyk, P., & Vigorito, J. (1971). Speech perception in infants. *Science*, 171(968), 303-306.
- Ellis, A.W. (1988). Normal writing processes and peripheral acquired dysgraphias. *Language and Cognitive Processes*, 3(2), 99-127.
- Ellis, A.W. (1993). *Reading, writing and dyslexia. A cognitive analysis*. Hove: Laurence Erlbaum Associates.
- Ellis, A.W. & Young, A. (1988). *Human cognitive neuropsychology*. Hove, UK: Erlbaum.

- Exner,S. (1881). *Untersuchungen über die localisation der functionen in der großhirnrinde des menschen*. Wien: Wilhelm Braumüller.
- Fadiga,L., Fogassi,L., Pavesi,G., & Rizzolatti,G. (1995). Motor facilitation during action observation: a magnetic stimulation study. *Journal of Neurophysiology*, 73(6), 2608-2611.
- Fagg,A.H. & Arbib,M.A. (1998). Modeling parietal-premotor interactions in primate control of grasping. *Neural Networks*, 11, 1277-1303.
- Fawcett,A.J. & Nicolson,R.I. (1999). Performance of dyslexic children on cerebellar and cognitive tests. *Journal of Motor Behavior*, 31(1), 68-78.
- Fayol,M., Barrouillet,P., & Marinthe,C. (1998). Predicting arithmetical achievement from neuropsychological performance: a longitudinal study. *Cognition*, 68, B63-B70.
- Ferreiro,E. & Gomez Palacio,M. (1988). *Lire-écrire à l'école: comment s'y aprennent-ils ?* Lyon: CRDP.
- Fiez,J.A. & Petersen,S.E. (1998). Neuroimaging studies of word reading. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 95(3), 914-921.
- Fink,G.R., Frackowiak,R.S.J., Pietrzyk,U., & Passingham,R.E. (1997). Multiple nonprimary motor areas in the human cortex. *Journal of Neurophysiology*, 77, 2164-2174.
- Fink,G.R., Halligan,P.W., Marshall,J.C., Frith,C.D., Frackowiak,R.S.J., & Dolan,R.J. (1996). Where in the brain does visual attention select the forest and the trees? *Nature*, 382, 626-628.
- Fioravanti,M. & Di Cesare,F. (1992). Forgetting curves in long-term memory: evidence for a multistage model of retention. *Brain and Cognition*, 18, 116-124.
- Fitzgerald,J. & Shanahan,T. (2000). Reading and writing relationships and their development. *Educational Psychologist*, 35(1), 39-50.
- Flores d'Arcais,G.B. (1994). Order of strokes writing as a cue for retrieval in reading Chinese characters. *European Journal of Cognitive Psychology*, 6(4), 337-355.
- Fogassi,L., Gallese,V., Fadiga,L., Luppino,G., Matelli,M., & Rizzolatti,G. (1996). Coding of peripersonal space in inferior premotor cortex (area F4). *Journal of Neurophysiology*, 76(1), 141-157.
- Freyd,J.J. (1983). Representing the dynamics of a static form. *Memory and Cognition*, 11, 342-346.
- Freyd,J.J. (1987). Dynamic mental representations. *Psychological Review*, 94(4), 427-438.
- Friston,K.J. (2003). Experimental design and statistical parametric mapping. In R.S.J.Frackowiak (Ed.), *Human brain function* (pp. -). Elsevier Academic Press.
- Friston,K.J., Holmes,A.P., Poline,J.B., Grasby,P.J., Williams,S.R.C., Frackowiak,R.S.J., & Turner,R. (1995). Analysis of fMRI time-series revisited. *NeuroImage*, 2, 45-53.
- Gaillard,W.D., Balsamo,L.M., Ibrahim,Z., Sachs,B.C., & Xu,B. (2003). fMRI identifies regional specialization of neural networks for reading in young children. *Neurology*, 60, 94-100.
- Gallese,V. (2000). The inner sense of action: agency and motor representations. *Journal of Consciousness Studies*, 7, 23-40.
- Gallese,V., Fadiga,L., Fogassi,L., & Rizzolatti,G. (1996). Action recognition in the premotor cortex. *Brain*, 119(2), 593-609.
- Gallese,V. & Goldman,A. (1998). Mirror neurons and the simulation theory of mind-reading. *Trends in Cognitive Sciences*, 2, 493-501.

- Gentner,D.R. (1983). The acquisition of typewriting skill. *Acta Psychologica*, 54(1-3), 233-248.
- Gentner,D.R. (1987). Timing of skilled motor performance: tests of the proportional duration model. *Psychological Review*, 94(2), 255-276.
- Gerardin,E., Sirigu,A., Lehericy,S., Poline,J.B., Gaymard,B., Marsault,C., Agid,Y., & Le Bihan,D. (2000). Partially overlapping neural networks for real and imagined hand movements. *Cerebral Cortex*, 10, 1093-1104.
- Gerlach,C., Law,I., Gade,A., & Paulson,O.B. (2002). The role of action knowledge in the comprehension of artefacts- a PET study. *NeuroImage*, 15, 143-152.
- Gerstmann,J. (1957). Some notes on the Gerstmann syndrome. *Neurology*, 7, 866-869.
- Gibson,E.J., Gibson,J.J., Pick,A.D., & Osser,H. (1962). A developmental study of the discrimination of letter-like forms. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, 55(6), 897-906.
- Gitelman,D.R., Nobre,A.C., Parrish,T.B., LaBar,K.S., Kim,Y., Meyer,J.R., & Mesulam,M.M. (1999). A large-scale distributed network for covert spatial attention. Further anatomical delineation based on stringent behavioural and cognitive controls. *Brain*, 122, 1093-1106.
- Goodale,M.A. & Milner,A.D. (1992). Separate visual pathways for perception and action. *Trends In Neurosciences*, 15, 20-25.
- Goodnow,J.J. & Levine,R.A. (1973). "The grammar of action" : Sequence and syntax in children's copying. *Cognitive Psychology* , 4, 82-98.
- Gordinier,H.C. (1899). A case of brain tumor at the base of the second left frontal convolution. *American Journal of Medical Science*, 117, 526-535.
- Grabowski,T.J., Damasio,H., & Damasio,A.R. (1998). Premotor and prefrontal correlates of category-related lexical retrieval. *NeuroImage*, 7, 232-243.
- Graham,S. & Weintraub,N. (1996). A review of handwriting research: Progress and prospects from 1980 to 1994. *Educational Psychology Review*, 8(1), 7-87.
- Grainger,J. & Dijkstra,T. (1996). Visual word recognition: models and experiments. In T.Dijkstra & K.de Smet (Eds.), *Computational psycholinguistics: A.I. and connexionist models of language processing* (pp. 139-165). London: Taylor and Francis.
- Graziano,M.S.A. & Gross,C.G. (1998). Spatial maps and the control of movement. *Current Opinion in Neurobiology*, 8, 195-201.
- Graziano,M.S.A., Hu,X.T., & Gross,C.G. (1997). Coding the locations of objects in the dark. *Science*, 277, 239-241.
- Grèzes,J., Armony,J.L., Rowe,J., & Passingham,R.E. (2003). Activations related to "mirror" and "canonical" neurones in the human brain: an fMRI study. *NeuroImage*, 18, 928-937.
- Grosbras,M.H. & Paus,T. (2002). Transcranial magnetic stimulation of the human frontal eye field: effects on visual perception and attention. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14(7), 1109-1120.
- Habib,M. (2000). The neurobiological basis of developmental dyslexia: an overview and working hypothesis. *Brain*, 123, 2373-2399.
- Halligan,P.W. & Marshall,J.C. (1991). Left neglect for near but not far space in man. *Nature*, 352(6337), 673-674.
- Hanakawa,T., Honda,M., Sawamoto,N., Okada,T., Yonekura,Y., Fukuyama,H., & Shibasaki,H. (2002). The role of rostral Brodmann area 6 in mental operation tasks: an integrative neuroimaging approach. *Cerebral Cortex*, 12, 1157-1170.

- Hanakawa,T., Immisch,I., Toma,K., Dimyan,M.A., Van Gelderen,P., & Hallett,M. (2003). Functional properties of brain areas associated with motor execution and imagery. *Journal of Neurophysiology*, 89, 989-1002.
- Handy,T.C., Grafton,S.T., Shroff,N.M., Ketay,S., & Gazzaniga,M.S. (2003). Graspable objects grab attention when the potential for action is recognized. *Nature Neuroscience*, 6(4), 421-427.
- Hanley,J.R. & Peters,S. (1996). A dissociation between the ability to print and write cursively in lower-case letters. *Cortex*, 32, 737-745.
- Hari,R., Forss,N., Avikainen,S., Kirveskari,E., Salenius,S., & Rizzolatti,G. (1998). Activation of human primary motor cortex during action observation : a neuromagnetic study. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 95(25), 15061-15065.
- Hari,R., Levänen,S., & Raij,T. (2000). Timing of human cortical functions during cognition: role of MEG. *Trends in Cognitive Sciences*, 2(12), 455-462.
- Haueisen,J. & Knösche,T. (2001). Involuntary motor activity in pianists evoked by music perception. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 13(6), 786-792.
- Hay,L. & Velay,J.L. (2003). Interhemispheric relationships in 4- to 14-year-old children pointing to lateral targets. *Neuroreport*, 14(7), 1041-1044.
- Hebb,D.O. (1958). *Psycho-physiologie du comportement*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Heilman,K.M., Coyle,J.M., Gonyea,E.F., & Geschwind,N. (1973). Apraxia and agraphia in a left-hander. *Brain*, 96, 21-28.
- Held,R. & Hein,A. (1963). Movement-produced stimulation in the development of visually guided behavior. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, 56, 872-876.
- Helenius,P., Tarkiainen,A., Cornelissen,P., Hansen,P.C., & Salmelin,R. (1999). Dissociation of normal feature analysis and deficient processing of letter-strings in dyslexic adults. *Cerebral Cortex*, 9(5), 476-483.
- Hellige,J.B. & Webster,R. (1979). Right hemisphere superiority for initial stages of letter processing. *Neuropsychologia*, 17, 653-660.
- Helmholtz,H.v. (1867). *Handbuch der physiologischen optik*. Leipzig: Voss.
- Herron,J., Galin,D., Johnstone,J., & Ornstein,R.E. (1979). Cerebral specialization, writing posture, and motor control of writing in left-handers. *Science*, 205, 1285-1289.
- Heuer,H. & Schmidt,R.A. (1988). Transfer of learning among motor patterns with different relative timing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 14(2), 241-252.
- Hécaen,H. & Sauguet,J. (1971). Cerebral dominance in left-handed subjects. *Cortex*, 7(1), 19-48.
- Hodges,J.R. (1991). Pure apraxic agraphia with recovery after drainage of a left frontal cyst. *Cortex*, 27, 469-473.
- Hulme,C. (1979). The interaction of visual and motor memory for graphic forms following tracing. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 31, 249-261.
- Hulme,C., Monke,A., & Ives,S. (1987). Some experimental studies of multisensori teaching: the effects of manual tracing on children's paired-associate learning. *British Journal of Developmental Psychology*, 5, 299-307.
- Jacobs,A.M. & Grainger,J. (1991). Automatic letter priming in an alphabetic decision task. *European Journal of Cognitive Psychology*, 3, 413-434.

- Jacobs,A.M. & Grainger,J. (1994). Models of visual word recognition: sampling the state of the art. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 20(6), 1311-1334.
- Jean,G. (1987). *L'écriture, mémoire des hommes*. Paris: Gallimard.
- Jeannerod,M. (1994). The representing brain: neural correlates of motor intention and imagery. *Behavioral and Brain Sciences* , 17, 187-245.
- Jeannerod,M. (2001). Neural simulation of action: A unifying mechanism for motor cognition. *NeuroImage*, 14, S103-S109.
- Jeannerod,M., Arbib,M.A., Rizzolatti,G., & Sakata,H. (1995). Grasping objects: the cortical mechanisms of visuomotor transformation. *Trends In Neurosciences*, 18, 314-320.
- Johansson,G. (1973). Visual perception of biological motion and a model for its analysis. *Perception and Psychophysics*, 14(2), 201-211.
- Kakei,S., Hoffman,D.S., & Strick,P.L. (2001). Direction of action is represented in the premotor cortex. *Nature Neuroscience* , 4(10), 1020-1025.
- Kandel,S., Orliaguet,J.P., & Viviani,P. (2000). Perceptual anticipation in handwriting: The role of implicit motor competence. *Perception and Psychophysics*, 62(4), 706-716.
- Karnath,H.-O., Ferber,S., & Bulthoff,H.H. (2000). Neuronal representation of object orientation. *Neuropsychologia*, 38(9), 1235-1241.
- Kassubek,J., Schmidtke,K., Kimmig,H., Lucking,C.H., & Greenlee,M.W. (2001). Changes in cortical activation during mirror reading before and after training: an fMRI study of procedural learning. *Brain Research Cognitive Brain Research*, 10(3), 207-217.
- Katanoda,K., Yoshikawa,K., & Sugishita,M. (2001). A functional MRI study on the neural substrates for writing. *Human Brain Mapping*, 13, 34-42.
- Kato,C., Isoda,H., Takehar,Y., Matsuo,K., Moriya,T., & Nakai,T. (1999). Involvement of motor cortices in retrieval of kanji studied by functional MRI. *Neuroreport*, 10, 1335-1339.
- Kellenbach,M.L., Brett,M., & Patterson,K. (2003). Actions speak louder than functions: the importance of manipulability and action in tool representation. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15(1), 30-46.
- Knecht,S., Drager,B., Deppe,M., Bobe,L., Lohmann,H., Floel,A., Ringelstein,E.B., & Henningsen,H. (2000). Handedness and hemispheric language dominance in healthy humans. *Brain*, 123(12), 2512-2518.
- Knoblich,G., Seigerschmidt,E., Flach,R., & Prinz,W. (2002). Authorship effects in the prediction of handwriting strokes: evidence for action simulation during action perception. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 55(3), 1027-1046.
- Kohler,E., Keysers,C., Umiltà,M.A., Fogassi,L., Gallese,V., & Rizzolatti,G. (2002). Hearing sounds, understanding actions: action representation in mirror neurons. *Science*, 297(5582), 846-848.
- Kosslyn,S.M., Cave,C.B., Provost,D., & Von Gierke,S. (1988). Sequential processes in image generation. *Cognitive Psychology*, 20, 319-343.
- Kosslyn,S.M., Thompson,W.L., & Alpert,N.M. (1997). Neural Systems Shared by Visual Imagery and Visual Perception: A Positron Emission Tomography Study. *NeuroImage*, 6(4), 320-334.
- Kourtzi,Z. & Kanwisher,N. (2001). Representation of perceived object shape by the human lateral occipital complex. *Science*, 293, 1506-1509.
- Kuhl,P.K. & Meltzoff,A.N. (1982). The bimodal perception of speech in infancy. *Science*, 218(4577), 1138-1141.

- Kuriki,S., Hirata,Y., Fujimaki,N., & Kobayashi,T. (1996). Magnetoencephalographic study on the cerebral neural activities related to the processing of visually presented characters. *Cognitive Brain Research*, 4, 185-199.
- Lacquaniti,F., Terzuolo,C.A., & Viviani,P. (1983). The law relating the kinematic and figural aspects of drawing movements. *Acta Psychologica*, 54(1-3), 115-130.
- Lamm,C., Windischberger,C., Leodolter,U., Moser,E., & Bauer,H. (2001). Evidence for premotor cortex activity during dynamic visual imagery from single trial functional magnetic resonance imaging and slow cortical potentials. *NeuroImage*, 14, 268-283.
- Levine,D.N., Mani,R.B., & Calvanio,R. (1988). Pure agraphia and Gerstmann's syndrome as a visuospatial-language dissociation: an experimental case study. *Brain and Language*, 35, 172-196.
- Lieberman,A.M., Cooper,F.S., Shankweiler,D.P., & Studdert-Kennedy,M.G. (1967). Perception of the speech code. *Psychological Review*, 74, 431-461.
- Lieberman,A.M. & Mattingly,I.G. (1985). The motor theory of speech perception revised. *Cognition*, 21(1), 1-36.
- Lieberman,I.A., Shankweiler,D., & Orlando,C. (1971). Letter confusions and reversals of sequence in the beginning reader: implications for Orton's theory of developmental dyslexia. *Cortex*, 7, 127-142.
- Logan,F.A. (1999). Errors in Copy Typewriting. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25(6), 1760-1773.
- Logothetis,N. (2003). The underpinnings of the BOLD functional magnetic resonance imaging signal. *Journal of Neuroscience*, 23(10), 3963-3971.
- Logothetis,N., Pauls,J., Augath,M., Trinath,T., & Oeltermann,A. (2001). Neurophysiological investigation of the basis of the fMRI signal. *Nature*, 412, 150-157.
- Longcamp,M. (2000). *Motricité manuelle et perception du langage écrit: comparaison des écritures manuscrite et dactylographique*. Université Aix-Marseille I: DEA de Neurosciences.
- Luciana,M. & Nelson,C.A. (1998). The functional emergence of prefrontally-guided working memory systems in four- to eight-year-old children. *Neuropsychologia*, 36(3), 273-293.
- Lurçat,L. (1980). *L'activité graphique à l'école maternelle*. Paris: ESF.
- Magnié,M.N., Ferreira,C.T., Guisiano,B., & Poncet,M. (1999). Category specificity in object agnosia: preservation of sensorimotor experiences related to objects. *Neuropsychologia*, 37, 67-74.
- Mangin,J.F., Régis,J., Rivière,D., Cointepas,Y., Ochiai,T., Papadopoulos-Orfanos,D.L., Collins,D.L., & Evans,A.C. (2003). Structure based morphometry of cortical folding correlates of handedness. Presented at the 9th international conference on functional mapping of the human brain, June 19-22, 2003, New York, NY. Available on CD-Rom in *NeuroImage*, 19(2).
- Margolin,D.I. (1980). Right hemisphere dominance for praxis and left hemisphere dominance for speech in a left-hander. *Neuropsychologia*, 18, 715-719.
- Margolin,D.I. & Binder,L. (1984). Multiple component agraphia in a patient with atypical cerebral dominance: An error analysis. *Brain and Language*, 22, 26-40.
- Martin,A., Ungerleider,L.G., & Haxby,J.V. (2000). Category specificity and the brain: the sensory/motor model of semantic representations of objects. In M.S. Gazzaniga (Ed.), *The Cognitive Neurosciences* (pp. 1023-1036). Cambridge, MA: MIT Press.
- Massaro,D.W. & Klitzke,D. (1977). Letters are functional in word identification. *Memory and Cognition*, 5(3), 292-298.

- Matsuo,K., Kato,C., Okada,T., Moriya,T., Glover,G.H., & Nakai,T. (2003). Finger movements lighten neural loads in the recognition of ideographic characters. *Cognitive Brain Research*, 17, 263-272.
- Matsuo,K., Nakai,T., Kato,C., Moriya,T., Isoda,H., Takehara,Y., & Sakahara,H. (2000). Dissociation of writing processes: functional magnetic resonance imaging during writing of Japanese ideographic characters. *Brain Research Cognitive Brain Research*, 9(3), 281-286.
- Mayall,K., Humphreys,G.W., Mechelli,A., Olson,A., & Price,C. (2001). The effects of case mixing on word recognition: evidence from a PET study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 13(6), 844-853.
- Mayall,K., Humphreys,G.W., & Olson,A. (1997). Disruption to word or letter processing? The origins of case-mixing effects. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 23(5), 1275-1286.
- Mayer,E., Martory,M.D., Pegna,A.J., Landis,T., Delavelle,J., & Annoni,J.M. (1999). A pure case of Gertsman syndrome with a subangular lesion. *Brain*, 122, 1107-1120.
- McClelland,J.L. & Rumelhart,D.E. (1981). An interactive activation model of context effects in letter perception: part 1. An account of basic findings. *Psychological Review*, 88(5), 375-407.
- McGurk,H. & MacDonald,J. (1976). Hearing lips and seeing voices. *Nature*, 264, 746-748.
- Mechelli,A., Gorno-Tempini,M.L., & Price,C.J. (2003). Neuroimaging studies of word and pseudoword reading: consistencies, inconsistencies, and limitations. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15(2), 260-271.
- Mecklinger,A., Gruenewald,C., Besson,M., Magnié,M.N., & von Cramon,D.Y. (2002). Separable neuronal circuitries for manipulable and non-manipulable objects in working memory. *Cerebral Cortex*, 12, 1115-1123.
- Mellet,E., Tzourio,N., Crivello,F., Joliot,M., Denis,M., & Mazoyer,B. (1996). Functional anatomy of spatial mental imagery generated from verbal instructions. *Journal of Neurosciences*, 16(20), 6504-6512.
- Menon,V. & Desmond,J.E. (2001). Left superior parietal cortex involvement in writing: integrating fMRI with lesion evidence. *Cognitive Brain Research*, 12, 337-340.
- Merton,P.A. (1972). How we control the contraction of our muscles. *Scientific American*, 226, 30-37.
- Meulenbroek,R.G.J. & Thomassen,A.J.W.M. (1991). Stroke-direction preferences in drawing and handwriting. *Human Movement Science*, 10(2-3), 247-270.
- Milner,P.M. (1996). Neural representations: some old problems revisited. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 8(1), 69-77.
- Miozzo,M. & Caramazza,A. (1998). Varieties of pure alexia: the case of failure to access graphemic representations. *Cognitive Neuropsychology*, 15(1/2), 203-238.
- Montant,M. & Behrmann,M. (2000). Pure alexia. *Neurocase*, 6, 265-294.
- Montessori,M. (1912). *The Montessori method*. New York: Frederick A. Strokes Company.
- Moore,T. & Armstrong,K.M. (2003). Selective gating of visual signals by microstimulation of frontal cortex. *Nature*, 421, 370-373.
- Mountcastle,V.B., Lynch,J.C., Georgopoulos,A.P., Sakata,H., & Acuna,C. (1975). Posterior parietal association cortex of the monkey: command functions for operations within extrapersonal space. *Journal of Neurophysiology*, 38(4), 871-908.
- Murata,A., Fadiga,L., Fogassi,L., Gallese,V., Raos,V., & Rizzolatti,G. (1997). Object representation in the ventral premotor cortex (area F5) of the monkey. *Journal of Neurophysiology*, 78, 2226-2230.

- Murata,A., Gallese,V., Luppino,G., Kaseda,M., & Sakata,H. (2000). Selectivity for the shape, size, and orientation of objects for grasping in neurons of monkey parietal area AIP. *Journal of Neurophysiology*, 83, 2580-2601.
- Mycroft,R., Hanley,J.R., & Kay,J. (2002). Preserved access to abstract letter identities despite abolished letter naming in a case of pure alexia. *Journal of Neurolinguistics*, 15(2), 99-108.
- Naka,M. (1998). Repeated writing facilitates children's memory for pseudocharacters and foreign letters. *Memory and Cognition*, 26(4), 804-809.
- Naka,M. & Naoi,H. (1995). The effect of repeated writing on memory. *Memory and Cognition*, 23(2), 201-212.
- Näslund,J.C. & Schneider,W. (1996). Kindergarten letter knowledge, phonological skills, and memory processes: relative effects on early literacy. *Journal of Experimental Child Psychology*, 62, 30-59.
- Nicolson,R.I., Fawcett,A.J., Berry,E.L., Jenkins,I.H., Dean,P., & Brooks,D.J. (1999). Association of abnormal cerebellar activation with motor learning difficulties in dyslexic adults. *Lancet*, 353(9165), 1662-1667.
- Nicolson,R.I., Fawcett,A.J., & Dean,P. (2001). Developmental dyslexia: the cerebellar deficit hypothesis. *Trends In Neurosciences*, 24(9), 508-511.
- Niederbuhl,J. & Springer,S.P. (1979). Task requirements and hemispheric asymmetry for the processing of single letters. *Neuropsychologia*, 17, 689-692.
- Nihei,Y. (1983). Developmental change in covert principles for the organization of strokes in drawing and handwriting. *Acta Psychologica*, 54(1-3), 221-232.
- Nishitani,N. & Hari,R. (2000). Temporal dynamics of cortical representation for action. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 97(2), 913-918.
- Nobre,A.C., Sebestyen,G.N., Gitelman,D.R., Mesulam,M.M., Frackowiak,R.S.J., & Frith,C.D. (1997). Functional localization of the system for visuospatial attention using positron emission tomography. *Brain*, 120, 515-533.
- Ogawa,S., Lee,T.M., Nayak,A.S., & Glynn,P. (1990). Oxygenation-sensitive contrast in magnetic resonance image of rodent brain at high magnetic fields. *Magnetic Resonance Medicine*, 14, 68-78.
- Ohno,T., Bando,M., Nagura,H., Ishii,K., & Yamanouchi,H. (2000). Apraxic agraphia due to thalamic infarction. *Neurology*, 54, 2336-2339.
- Oldfield,R.C. (1971). The assessment and analysis of handedness. *Neuropsychologia*, 9, 97-113.
- Orliaguet,J.P., Kandel,S., & Boe,L.J. (1997). Visual perception of motor anticipation in cursive handwriting: Influence of spatial and movement information on the prediction of forthcoming letters. *Perception*, 26, 905-912.
- Otsuki,M., Soma,Y., Arai,T., Otsuka,A., & Tsuji,S. (1999). Pure apraxic agraphia with abnormal writing stroke sequences: report of a Japanese patient with a left superior parietal haemorrhage. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 66(2), 233-237.
- Paillard,J. (1971). Les déterminants moteurs de l'organisation spatiale. *Cahiers de Psychologie*, 14(4), 261-316.
- Paillard,J. (1990). Les bases nerveuses du contrôle visuo-manuel de l'écriture. In J.Irigouin, E.Poulle, & C.Sirat (Eds.), *L'écriture, l'oeil et la main* Paris: Editions du CNRS.
- Paillard,J. (1999). Motor determinants of a unified world perception. In G.Aschersleben, T.Bachmann, & J.Müsseler (Eds.), *Cognitive Contributions to the Perception of Spatial and Temporal Events* (pp. 95-111). Elsevier Science B.V.
- Pascual-Leone,A. (2003). The brain that makes music and is changed by it. In I.Peretz & R.J.Zatorre (Eds.), *The cognitive neuroscience of music* (pp. 396-409). Oxford: Oxford University Press.

- Patterson,K. & Wing,A.M. (1989). Processes in handwriting: a case for case. *Cognitive Neuropsychology*, 6(1), 1-23.
- Patterson,K.E. (1981). Neuropsychological approaches to the study of reading. *British Journal of Psychology*, 72, 151-174.
- Paulesu,E., Frith,C.D., & Frackowiak,R.S.J. (1993). The neural correlates of the verbal component of working memory. *Nature*, 362, 342-345.
- Paus,T. (1996). Location and function of the human frontal eye-field: a selective review. *Neuropsychologia*, 34(6), 475-483.
- Paus,T., Zijdenbos,A., Worsley,K.J., Collins,D.L., Blumenthal,J., & Giedd,J.N. (1999). Structural maturation of neural pathways in children and adolescents: in vivo study. *Science*, 283, 1908-1911.
- Penhune,V.B. & Doyon,J. (2002). Dynamic cortical and subcortical networks in learning and delayed recall of timed motor sequences. *Journal of Neuroscience*, 22(4), 1397-1406.
- Perri,R., Bartolomeo,P., & Silveri,M.C. (1996). Letter dyslexia in a letter by letter reader. *Brain and Language*, 53, 390-407.
- Pesenti,M., Thioux,M., Seron,X., & De Volder,A. (2000). Neuroanatomical substrates of arabic number processing, numerical comparison, and simple addition: a PET study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12(3), 461-479.
- Peters,M. & McGrory,J. (1987). The writing performance of inverted and noninverted right- and left-handers. *Canadian Journal of Psychology*, 41, 20-32.
- Petersen,S.E., Fox,P.T., Snyder,A.Z., & Raichle,M.E. (1990). Activation of extrastriate and frontal cortical areas by visual words and word-like stimuli. *Science*, 249, 1041-1044.
- Petit,J.P. (2002). La reconnaissance des lettres: combinaison des techniques comportementales et électrophysiologiques. Thèse de Neurosciences, Université d'Aix-Marseille I).
- Piaget,J. (1948). *La naissance de l'intelligence chez l'enfant*. Neuchatel, Paris: Delachaux et Niestlé.
- Picard,N. & Strick,P.L. (2001). Imaging the premotor areas. *Current Opinion in Neurobiology*, 11(6), 663-672.
- Pick,H.L.J. & Teulings,H.L. (1983). Geometric transformations of handwriting as a function of instruction and feedback. *Acta Psychologica*, 54(1-3), 327-340.
- Pitres,A. (1884). Considérations sur l'agraphie. A propos d'une observation nouvelle d'agraphie motrice pure. *Revue de Médecine*, 3(3), 855-873.
- Poincaré,H. (1905). *La science et l'hypothèse*. Paris: Flammarion.
- Poitou,J.P. (1992). Nouvelles technologies et élévation des qualifications: à propos du rôle de la visuo-motricité et de la motricité graphique dans l'activité cognitive globale du technicien de bureau d'étude. *Intellectica*, 1/2, 185-217.
- Polk,T.A. & Farah,M.J. (1998). The neural development and organization of letter recognition: Evidence from functional neuroimaging, computational modeling, and behavioral studies. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 95, 847-852.
- Polk,T.A., Stallcup,M., Aguirre,G.K., Alsop,D.C., D'Esposito,M., Detre,D.A., & Farah,M.J. (2003). Neural specialization for letter recognition. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14(2), 145-159.
- Pollmann,S. & von Cramon,D.Y. (2000). Object working memory and visuospatial processing: functional neuroanatomy analyzed by event-related fMRI. *Experimental Brain Research*, 133, 12-22.

- Posner, M.I. & Keele, S.W. (1967). Decay of visual information from a single letter. *Science*, 158, 137-139.
- Posner, M.I. & Mitchell, R.F. (1967). Chronometric analysis of classification. *Psychological Review*, 74, 391-409.
- Price, C.J. & Delvin, J.T. (2003). The myth of the visual word form area. *NeuroImage*, 19, 473-481.
- Price, C.J., Wise, R.J.S., & Frackowiak, R.S.J. (1996). Demonstrating the implicit processing of visually presented words and pseudowords. *Cerebral Cortex*, 6, 62-70.
- Pulvermüller, F. (1999). Words in the brain language. *Behavioral and Brain Sciences*, 22(2), 253-336.
- Raichle, M.E. (2003). Functional brain imaging and human brain function. *Journal of Neuroscience*, 23(10), 3959-3962.
- Raij, T. (1999). Patterns of brain activity during visual imagery of letters. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 11(3), 282-299.
- Raij, T., Uutela, K., & Hari, R. (2000). Audiovisual integration of letters in the human brain. *Neuron*, 28, 617-625.
- Ramus, F. (2003). Developmental dyslexia: specific phonological deficit or general sensorimotor dysfunction? *Current Opinion in Neurobiology*, 13, 212-218.
- Rapp, B. & Caramazza, A. (1997). From graphemes to abstract letter shapes: levels of representation in written spelling. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 23(4), 1130-1152.
- Rauch, R. & Jenkins, J.R. (1994). Analysis of cross-sectional area measurements of the corpus callosum adjusted for brain size in male and female subjects from childhood to adulthood. *Behavioural Brain Research*, 64, 65-78.
- Rauschecker, J. (2003). Functional organization and plasticity of auditory cortex. In I. Peretz & R.J. Zatorre (Eds.), *The cognitive neuroscience of music* (pp. 358-365). Oxford: Oxford University Press.
- Richardson, M.J.E. & Flash, T. (2002). Comparing smooth arm movements with the two-third power law and the related segmented control hypothesis. *Journal of Neuroscience*, 22(18), 8201-8211.
- Richter, W., Somorjai, R., Summers, R., Jarmasz, M., Menon, R.S., Gati, J.S., Georgopoulos, A.P., Tegeler, C., Ugurbil, K., & Seong-Gi, K. (2000). Motor area activity during mental rotation studied by time-resolved single-trial fMRI. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12(2), 310-320.
- Rijntjes, M., Dettmers, C., Büchel, C., Kiebel, S., Frackowiak, R.S.J., & Weiller, C. (1999). A blueprint for movement: functional and anatomical representations in the human motor system. *The Journal of Neuroscience*, 19(18), 8043-8048.
- Rizzolatti, G. & Arbib, M.A. (1998). Language within our grasp. *Trends In Neurosciences*, 21(5), 188-194.
- Rizzolatti, G., Fadiga, L., Fogassi, L., & Gallese, V. (1997). The space around us. *Science*, 277, 190-191.
- Rizzolatti, G., Fadiga, L., Matelli, M., Bettinardi, V., Paulesu, E., Perani, D., & Fazio, F. (1996). Localisation of grasp representation in humans by PET scan: 1- observation versus execution. *Experimental Brain Research*, 111, 245-252.
- Rizzolatti, G., Fogassi, L., & Gallese, V. (2002). Motor and cognitive functions of the ventral premotor cortex. *Current Opinion in Neurobiology*, 12, 149-154.
- Rizzolatti, G. & Luppino, G. (2001). The cortical motor system. *Neuron*, 31, 889-901.
- Rizzolatti, G., Matelli, M., & Pavesi, G. (1983). Deficits in attention and movements following the removal of postarcuate (area 6) and prearcuate (area 8) cortex in macaque monkeys. *Brain*, 106, 655-673.

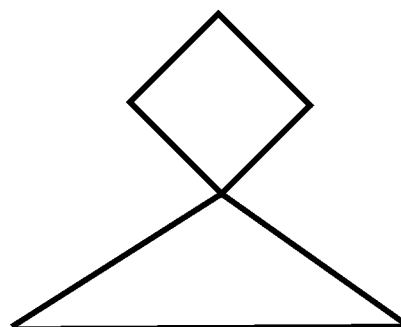
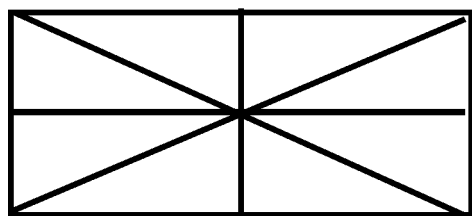
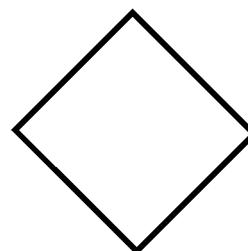
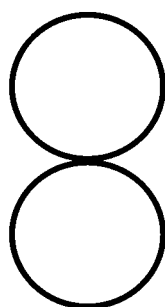
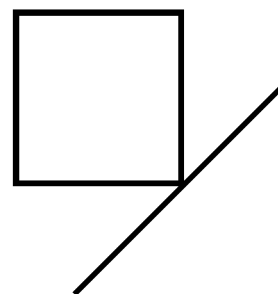
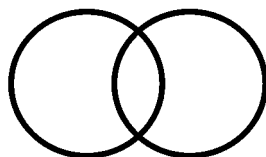
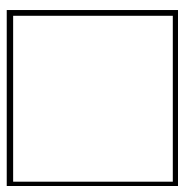
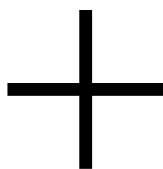
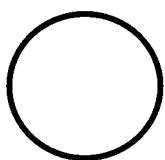
- Rizzolatti, G., Riggio, L., Dascola, I., & Umiltà, C. (1987). Reorienting attention across the horizontal and vertical meridians: evidence in favor of a premotor theory of attention. *Neuropsychologia*, 25, 31.
- Roeltgen, D. (1985). Agraphia. In K.M. Heilman & E. Valenstein (Eds.), *Clinical Neuropsychology* (pp. 75-96). New York: Oxford University Press.
- Roeltgen, D. & Heilman, K.M. (1983). Apractic agraphia in a patient with normal praxis. *Brain and Language*, 18, 35-46.
- Roll, J.P. & Gilhodes, J.C. (1995). Proprioceptive sensory codes mediating movement trajectory perception: Human hand vibration-induced drawing illusions. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology*, 73, 295-304.
- Russo, R. (1995). Developmental trends in implicit and explicit memory: a picture completion study. *Journal of Experimental Child Psychology*, 59, 566-578.
- Sakurai, Y., Matsumura, K., Iwatsubu, T., & Momose, T. (1997). Frontal pure agraphia for kanji or kana. *Neurology*, 49, 946-952.
- Schubotz, R.I. & von Cramon, D.Y. (2001). Functional organisation of the lateral premotor cortex: fMRI reveals different regions activated by anticipation of object properties, location and speed. *Cognitive Brain Research*, 11, 97-112.
- Schubotz, R.I. & von Cramon, D.Y. (2002). Predicting perceptual events activates corresponding motor schemes in lateral premotor cortex: an fMRI study. *NeuroImage*, 15, 787-796.
- Schwartz, A.B. (1994). Direct cortical representation of drawing. *Science*, 265, 540-542.
- Seitz, R.J., Canavan, A.G.M., Yägüez, L., Herzog, H., Tellmann, L., Knorr, U., Huang, Y., & Hömberg, V. (1997). Representations of graphomotor trajectories in the human parietal cortex: evidence for controlled processing and automatic performance. *European Journal of Neurosciences*, 9, 378-389.
- Seki, K., Yajima, M., & Sugishita, M. (1995). The efficacy of kinesthetic reading treatment for pure alexia. *Neuropsychologia*, 33(5), 595-609.
- Sereno, A.B. & Maunsell, J.H.R. (1998). Shape selectivity in primate lateral intraparietal cortex. *Science*, 280, 500-503.
- Shadmehr, R. & Brashers-Krug, T. (1997). Functional stages in the formation of human long-term motor memory. *The Journal of Neuroscience*, 17(1), 409-419.
- Shadmehr, R. & Holcomb, H.H. (1997). Neural correlates of motor memory consolidation. *Science*, 277, 821-825.
- Shepard, R.N. & Metzler, J. (1971). Mental rotation of three-dimensional objects. *Science*, 171(972), 701-703.
- Siebner, H.R., Limmer, C., Peinemann, A., Bartenstein, P., Drzezga, A., & Conrad, B. (2001). Brain correlates of fast and slow handwriting in humans: a PET-performance correlation analysis. *European Journal of Neurosciences*, 14(4), 726-736.
- Siebner, H.R., Limmer, C., Peinemann, A., Drzezga, A., Bloem, B.R., Schwaiger, M., & Conrad, B. (2002). Long-term consequences of switching handedness: a positron emission tomography study. *Journal of Neuroscience*, 22(7), 2816-2825.
- Simon, T.J. (1999). The foundations of numerical thinking in a brain without numbers. *Trends in Cognitive Sciences*, 3(10), 363-364.
- Sirigu, A., Daprati, E., Pradat-Diehl, P., Franck, N., & Jeannerod, M. (1999). Perception of self-generated movement following left parietal lesion. *Brain*, 122(10), 1867-1874.

- Sirigu,A., Duhamel,J.R., & Poncet,M. (1991). The role of sensorimotor experience in object recognition : a case of multimodal agnosia. *Brain*, 114, 2555-2573.
- Smith,E.E. & Jonides,J. (1999). Storage and executive processes in the frontal lobe. *Science*, 283, 1657-1661.
- Smits-Engelsman,B.C.M. & van Galen,G.P. (1997). Dysgraphia in children: Lasting psychomotor deficiency or transient developmental delay? *Journal of Experimental Child Psychology*, 67, 164-184.
- Smyth,M.M. & Silvers,G. (1987). Functions of vision in the control of handwriting. *Acta Psychologica*, 65(1), 47-64.
- Taira,M., Mine,S., Georgopoulos,A.P., Murata,A., & Sakata,H. (1990). Parietal cortex neurons of the monkey related to the visual guidance of hand movements. *Experimental Brain Research*, 83, 29-36.
- Talairach,J. & Tournoux,P. (1988). *Co-planar stereotaxic atlas of the human brain*. New York: Thieme.
- Tarkiainen,A., Helenius,P., Hansen,P.C., Cornelissen,P.L., & Salmelin,R. (1999). Dynamics of letter string perception in the human occipitotemporal cortex. *Brain*, 122, 2119-2131.
- Teasdale,N., Forget,R., Bard,C., Paillard,J., Fleury,M., & Lamarre,Y. (1993). The role of proprioceptive information for the production of isometric forces and for handwriting tasks. *Acta Psychologica*, 82(1-3), 179-191.
- Terepocki,M., Kruk,R.S., & Willows,D.M. (2002). The incidence and nature of letter orientation errors in reading disability. *Journal of Learning Disabilities*, 35(3), 214-233.
- Terzuolo,C. & Viviani,P. (1980). Determinants and characteristics of motor patterns used for typing. *Neurosciences*, 5, 1085-1103.
- Teulings,H.L. & Schomaker,L.R.B. (1993). Invariant properties between stroke features in handwriting. *Acta Psychologica*, 82(1-3), 69-88.
- Teulings,H.L., Thomassen,A.J.W.M., & van Galen,G.P. (1983). Preparation of partly precued handwriting movements: The size of movement units in handwriting. *Acta Psychologica*, 54(1-3), 165-177.
- Thomassen,A.J.W.M., Meulenbroek,R.G.J., & Tibosh,H.J.C.M. (1991). Latencies and kinematics reflect graphic production rules. *Human Movement Science*, 10, 271-289.
- Thomassen,A.J.W.M. & Teulings,H.L. (1983). Constancy in stationary and progressive handwriting. *Acta Psychologica*, 54(1-3), 179-196.
- Thut,G., Hauert,C., Viviani,P., Morand,S., Spinelli,L., Blanke,O., Landis,T., & Michel,C. (2000). Internally driven vs. externally cued movement selection: a study on the timing of brain activity. *Brain Research Cognitive Brain Research*, 9(3), 261-269.
- Toma,K., Honda,M., Hanakawa,T., Okada,T., Fukuyama,H., Ikeda,A., Nishizawa,S., Konishi,J., & Shibasaki,H. (1999). Activities of the primary and supplementary motor areas increase in preparation and execution of voluntary muscle relaxation: an event-related fMRI study. *Journal of Neuroscience*, 19(9), 3527-3534.
- Treiman,R. & Broderick,V. (1998). What's in a name: children's knowledge about the letters in their own name. *Journal of Experimental Child Psychology*, 70, 97-116.
- Ungerleider,L.G., Doyon,J., & Karni,A. (2002). Imaging Brain Plasticity during Motor Skill Learning. *Neurobiology of Learning and Memory*, 78(3), 553-564.
- van Doorn,R.R.A. & Keuss,P.J.G. (1993). Spatial invariance in handwriting: a matter of definition. *Reading and Writing*, 5(3), 281-296.
- van Galen,G.P. (1980). Handwriting and drawing: A two stage model of complex motor behavior. In G.Stelmach & J.Requin (Eds.), *Tutorials in Motor Behavior* (pp. 567-578). Amsterdam: North Holland.

- van Galen, G.P. (1991). Handwriting: Issues for a psychomotor theory. *Human Movement Science*, 10(2-3), 165-191.
- van Galen, G.P., Portier, S.J., Smits-Engelsman, B.C.M., & Schomaker, L.R.B. (1993). Neuromotor noise and poor handwriting in children. *Acta Psychologica*, 82(1-3), 161-178.
- van Galen, G.P. & Teulings, H.L. (1983). The independent monitoring of form and scale factors in handwriting. *Acta Psychologica*, 54(1-3), 9-22.
- van Galen, G.P. & Weber, J.F. (1998). On-line size control in handwriting demonstrates the continuous nature of motor programs. *Acta Psychologica*, 100(1-2), 195-216.
- Vaughn, S., Schumm, J.S., & Gordon, J. (1992). Early spelling acquisition: Does writing really beat the computer? *Learning Disability Quarterly*, 15, 223-228.
- Vaughn, S., Schumm, J.S., & Gordon, J. (1993). Which motoric condition is most effective for teaching spelling to students with and without learning disabilities. *Journal of Learning Disabilities*, 26(3), 191-198.
- Velay, J.L., Daffaure, V., Giraud, K., & Habib, M. (2002). Interhemispheric sensorimotor integration in pointing movements: a study on dyslexic adults. *Neuropsychologia*, 40(7), 827-834.
- Viviani, P. (1990). Motor-perceptual interactions: the evolution of an idea. In M. Piatelli Palarini (Ed.), *Cognitive science in Europe: issues and trends* (pp. 11-39). Golem.
- Viviani, P., Baudouvy, G., & Redolfi, M. (1997). Perceiving and tracking kinesthetic stimuli: further evidence of motor-perceptual interactions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 23(4), 1232-1252.
- Viviani, P. & Flash, T. (1995). Minimum-jerk, two-thirds power law, and isochrony: converging approaches to movement planning. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21(1), 32-53.
- Viviani, P. & Laissard, G. (1996). Motor templates in typing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 22(2), 417-445.
- Viviani, P. & Schneider, R. (1991). A developmental study of the relation between geometry and kinematics in drawing movements. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 17(1), 198-218.
- Viviani, P. & Stucchi, N. (1989). The effect of movement velocity on form perception: Geometric illusions in dynamic displays. *Perception and Psychophysics*, 46(3), 266-274.
- Viviani, P. & Stucchi, N. (1992a). Biological movements look uniform: evidence of motor-perceptual interactions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18(3), 603-623.
- Viviani, P. & Stucchi, N. (1992b). Motor-perceptual interactions. In J. Requin & G. Stelmach (Eds.), *Tutorials in Motor Behavior II* (pp. 229-248). Amsterdam: Elsevier North-Holland.
- Viviani, P. & Terzuolo, C. (1980). Space-time invariance in learned motor skills. In G. Stelmach & J. Requin (Eds.), *Tutorials in Motor Behavior* (pp. 525-533). Amsterdam: North Holland.
- Viviani, P. & Terzuolo, C. (1982). Trajectory determines movement dynamics. *Neurosciences*, 7(2), 431-437.
- Viviani, P. & Terzuolo, C. (1983). The organisation of movement in handwriting and typing. In B. Butterworth (Ed.), *Language Production in non speech modalities* (pp. 104-146). London: Academic Press.
- Vuilleumier, P., Valenza, N., Mayer, E., Reverdin, A., & Landis, T. (1998). Near and far visual space in unilateral neglect. *Annals of Neurology*, 43(3), 406-410.
- Walker, M.P., Brakefield, T., Hobson, A.J., & Stickgold, R. (2003). Dissociable stages of human motor memory consolidation and reconsolidation. *Nature*, 425, 616-620.

- Warrington,E.K. & McCarthy,R.A. (1987). Categories of knowledge: further fractionations in an attempted integration. *Brain*, 110, 1273-1296.
- Warrington,E.K. & Shallice,T. (1984). Category specific semantic impairments. *Brain*, 107, 829-854.
- Watkins,K.E., Paus,T., Lerch,J.P., Zijdenbos,A., Collins,D.L., Neelin,P., Taylor,J., Worsley,K.J., & Evans,A.C. (2001). Structural asymmetries in the human brain: a voxel-based statistical analysis of 142 MRI scans. *Cerebral Cortex*, 11, 868-877.
- Watson,R.T. & Heilman,K.M. (1983). Callosal apraxia. *Brain*, 106, 391-404.
- Weiss,P.H., Marshall,J.C., Wunderlich,G., Tellmann,L., Halligan,P.W., Freund,H.J., Zilles,K., & Fink,G.R. (2000). Neural consequences of acting in near versus far space: a physiological basis for clinical dissociations. *Brain*, 123, 2531-2541.
- Wexler,M., Kosslyn,S.M., & Berthoz,A. (1998). Motor processes in mental rotation. *Cognition*, 68, 77-94.
- White,B.W., Saunders,F.A., Scadden,L., Bach-y-Rita,P., & Collins,C.C. (1970). Seeing with the skin. *Perception and Psychophysics*, 7, 23-27.
- Wing,A.M. (1978). Response timing in handwriting. In G.E. Stelmach (Ed.), *Information processing in motor control and learning* (pp. 153-172). San Diego, CA: Academic Press.
- Wright,C.E. (1993). Evaluating the special role of time in the control of handwriting. *Acta Psychologica*, 82(1-3), 5-52.
- Zago,L., Pesenti,M., Mellet,E., Crivello,F., Mazoyer,B., & Tzourio-Mazoyer,N. (2001). Neural correlates of simple and complex mental calculation. *NeuroImage*, 13, 314-327.
- Zangwill,O.L. (1954). Agraphia due to a left parietal glioma in a left handed man. *Brain*, 77, 510-520.
- Zerbato-Poudou,M.T. (1994). De la trace au sens: rôle de la médiation sociale dans l'apprentissage de l'écriture chez de jeunes enfants de maternelle. Université de Provence, Aix-Marseille I).
- Zerbato-Poudou,M.T. (2000). L'apprentissage premier de l'écriture: nouvelles conceptions. In R. Amigues & M.T. Zerbato-Poudou (Eds.), *Comment l'enfant devient élève. Les apprentissages à l'école maternelle* (pp. 135-202). Paris: RETZ.
- Zesiger,P. (1995). *Ecrire. Approches cognitive, neuropsychologique et développementale*. Paris: PUF.
- Zesiger,P., Pegna,A., & Rilliet,B. (1994). Unilateral dysgraphia of the dominant hand in a left-hander : a disruption of the graphic motor pattern selection. *Cortex*, 30, 673-683.
- Zola-Morgan,S.M. & Squire,L.R. (1990). The primate hippocampal formation: evidence for a time-limited role in memory storage. *Science*, 250, 288-290.

ANNEXES



Annexe 1.

Représentation des 10 figures géométriques composant le test de Bender, dans l'ordre de passation. Les figures ont été regroupées sur une même page.

Lettre	Complexité	Test 1				Test 2			
		MANUSCRIT							
		< 50 mois							
		RC	RM	RD	RDM	RC	RM	RD	RDM
C	2	0,50	0,40	0,00	0,10	0,45	0,50	0,00	0,05
J	2	0,35	0,50	0,15	0,00	0,65	0,25	0,05	0,05
L	2	0,45	0,30	0,00	0,25	0,50	0,40	0,00	0,10
D	3	0,25	0,50	0,10	0,15	0,35	0,40	0,15	0,10
F	3	0,45	0,25	0,20	0,10	0,35	0,20	0,25	0,20
G	3	0,30	0,50	0,05	0,15	0,35	0,45	0,10	0,10
P	3	0,40	0,50	0,05	0,05	0,45	0,45	0,00	0,10
E	4	0,55	0,40	0,05	0,00	0,30	0,60	0,10	0,00
N	4	0,70	0,25	0,05	0,00	0,60	0,40	0,00	0,00
Z	4	0,40	0,50	0,00	0,10	0,45	0,55	0,00	0,00
B	5	0,35	0,65	0,00	0,00	0,40	0,45	0,05	0,10
R	5	0,45	0,35	0,20	0,00	0,35	0,55	0,00	0,10
		> 50 mois							
		RC	RM	RD	RDM	RC	RM	RD	RDM
C	2	0,58	0,29	0,08	0,04	0,59	0,23	0,09	0,09
J	2	0,54	0,33	0,08	0,04	0,50	0,36	0,05	0,09
L	2	0,54	0,33	0,08	0,04	0,41	0,32	0,14	0,14
D	3	0,54	0,38	0,04	0,04	0,41	0,45	0,09	0,05
F	3	0,58	0,21	0,17	0,04	0,73	0,27	0,00	0,00
G	3	0,58	0,38	0,00	0,04	0,59	0,41	0,00	0,00
P	3	0,42	0,42	0,08	0,08	0,64	0,23	0,00	0,14
E	4	0,63	0,33	0,00	0,04	0,45	0,45	0,09	0,00
N	4	0,71	0,21	0,00	0,08	0,77	0,18	0,05	0,00
Z	4	0,63	0,38	0,00	0,00	0,59	0,36	0,05	0,00
B	5	0,38	0,54	0,04	0,00	0,50	0,45	0,05	0,00
R	5	0,71	0,13	0,13	0,04	0,68	0,27	0,05	0,00
Lettre	Complexité	Test 1				Test 2			
		CLAVIER							
		< 50 mois							
		RC	RM	RD	RDM	RC	RM	RD	RDM
C	2	0,36	0,50	0,05	0,09	0,45	0,35	0,10	0,10
J	2	0,36	0,36	0,09	0,18	0,45	0,25	0,25	0,05
L	2	0,82	0,09	0,09	0,00	0,60	0,10	0,20	0,10
D	3	0,27	0,45	0,00	0,27	0,40	0,50	0,00	0,10
F	3	0,45	0,36	0,00	0,18	0,35	0,45	0,05	0,15
G	3	0,41	0,32	0,18	0,09	0,40	0,25	0,25	0,10
P	3	0,36	0,55	0,05	0,05	0,45	0,45	0,05	0,05
E	4	0,55	0,41	0,05	0,00	0,45	0,45	0,10	0,00
N	4	0,50	0,41	0,05	0,05	0,45	0,45	0,05	0,05
Z	4	0,32	0,59	0,00	0,09	0,45	0,50	0,00	0,05
B	5	0,50	0,36	0,09	0,05	0,55	0,25	0,10	0,10
R	5	0,59	0,36	0,00	0,05	0,50	0,35	0,05	0,10
		> 50 mois							
		RC	RM	RD	RDM	RC	RM	RD	RDM
C	2	0,44	0,28	0,06	0,22	0,56	0,28	0,11	0,06
J	2	0,50	0,33	0,11	0,06	0,44	0,44	0,00	0,11
L	2	0,50	0,28	0,11	0,11	0,44	0,33	0,06	0,17
D	3	0,39	0,50	0,00	0,11	0,39	0,39	0,22	0,00
F	3	0,50	0,28	0,17	0,06	0,56	0,22	0,22	0,00
G	3	0,44	0,22	0,11	0,22	0,28	0,56	0,06	0,11
P	3	0,44	0,44	0,00	0,11	0,33	0,56	0,00	0,11
E	4	0,50	0,39	0,06	0,06	0,39	0,61	0,00	0,00
N	4	0,56	0,33	0,11	0,00	0,33	0,67	0,00	0,00
Z	4	0,22	0,61	0,11	0,06	0,50	0,44	0,00	0,06
B	5	0,61	0,33	0,06	0,00	0,39	0,61	0,00	0,00
R	5	0,67	0,17	0,06	0,11	0,39	0,50	0,06	0,06

Annexe 2. Résultats de l'analyse par lettre

Réponses correctes (RC), réponses en miroir (RM), réponses sur la lettre déformée (RD) et sur la lettre déformée et en miroir (RDM) pour les 12 lettres apprises (colonne de gauche), et pour les deux tests. Les valeurs représentent les % des réponses totales. Voir texte pour le calcul des scores de complexité des lettres.

